N° 472 • 6,20€ FÉVRIER 2013

LA Recherche

L'actualité des sciences

CLIMAT
CE QUI NOUS ATTEND VRAIMENT

› *Les modèles climatiques s'affinent*
› *Les quatre scénarios du réchauffement*

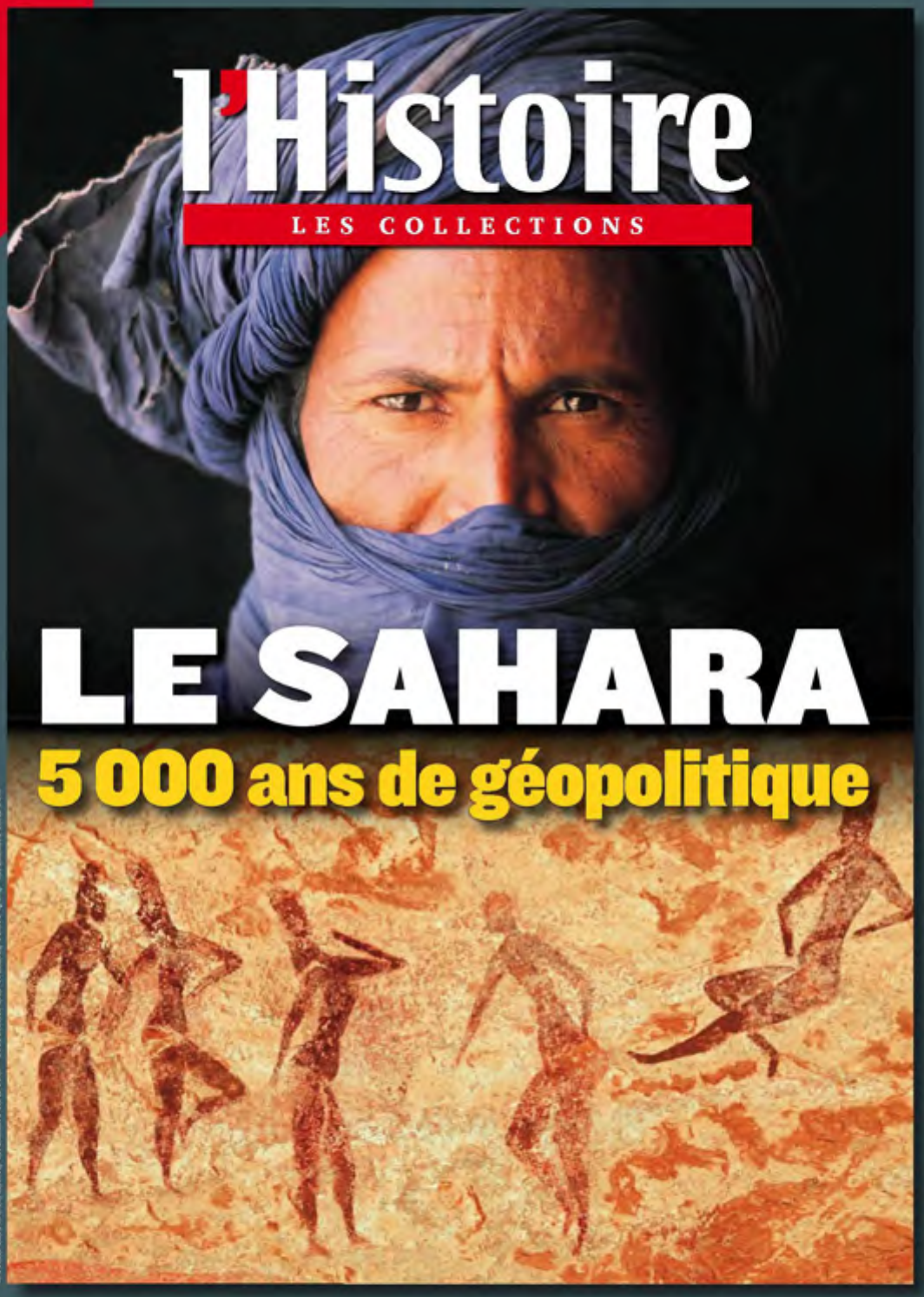
INFORMATIQUE Un cerveau virtuel de 2,5 millions de neurones

Histoire des sciences
La Lune fille de la Terre ?

M 01108 - 472 - F: 6,20 €

MENSUEL DOM 6,70 € BEL 7,20 € LUX 7,20 € D 7,90 € ESP 7,20 € GR 7,20 € ITA 7,20 € PORT.CONT 7,20 € CAN 10,50 $ CAN CH 12,40 FS MAR 60 DH TUN 6,10 TND MAYOTTE 8,70 € TOM SURFACE 920 XPF TOM AVION 1600 XPF - ISSN 00295611

www.histoire.presse.fr



CYRIL LETOURNEUR/GAMMA RAPHO - PATRICK DE WILDE/HOA-QUI/ GAMMA RAPHO

en kiosque

La Recherche

Sophia Publications
74, avenue du Maine 75014 Paris
Tél. : 01 44 10 10 10
Fax : 01 44 10 54 30
e-mail rédaction : courrier@larecherche.fr

Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 44 10, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : prenom.nom@larecherche.fr (sans accents).

La Recherche est publiée par **Sophia Publications**, filiale d'Artémis.
Président-directeur général et directeur de la publication **Philippe Clerget**
Conseiller de la direction **Jean-Michel Ghidaglia**

ABONNEMENTS
Tarif France :
1 an 12 n° : 65 €
1 an 12 n° + 6 Dossiers La Recherche : 96 €
Tarif international : nous contacter.
Tél. : 01 55 56 71 15
00 (33) 1 55 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com
Adresse : Service abonnements La Recherche, 17 route des Boulangers 78926 Yvelines Cedex 9
Suisse : Edigroup Tél. : (0041) 22 860 84 01
Belgique : Edigroup Tél. : (0032) 70 233 304
Achat de revues et d'écrins
La Recherche – BP65 – 24, chemin latéral 45390 Puiseaux – 02 38 33 42 89

Directrice de la rédaction **Aline Richard**
Assistante **Gabrielle Monrose (54 38)**

Rédacteur en chef **Luc Allemand**
Rédactrices en chef adjointes **Sophie Coisne (54 20)**, **Hélène Le Meur (54 21)**
Secrétaire générale de la rédaction **Catherine Caltaux (54 16)**
Chef de service **Marie-Laure Théodule (54 22)**
Chef de rubrique **Cécile Klingler (54 18)**
Rédacteurs **Rémi Canali (54 19)**, **Vincent Glavieux (54 29)**, **Fiorenza Gracci (54 24)**, **Lise Loumé (54 25)**

Conception graphique et direction artistique **Vincent Sainte Fare Garnot (54 13)**
1re rédactrice graphiste **Michèle Bourgeois (54 15)**
Service photo **Anne Viratelle (54 14)**
Secrétaire de rédaction **Morvan Léon (54 17)**
Responsable fabrication **Christophe Perrusson (13 78)**
Activités numériques **Emmanuelle Gérardin (54 52)**

Ont collaboré à ce numéro **Nicolas Mignerey**, **Marylène de Ruyter**, **Delphine Torrekens**

Directrice déléguée gestion et numérique **Dounia Ammor**
Responsable communication **Élodie Dantard (54 55)**
Directrice des ventes et promotion **Evelyne Miont (13 80)**
Vente messageries VIP diffusion **Frédéric Vinot numéro vert 0800 51 49 74**
Directrice commerciale et marketing **Virginie Marliac (54 49)**
Responsable du marketing direct **Linda Pain (54 51)**
Responsable gestion abonnements **Isabelle Parez (13 60)**
Responsable comptabilité **Sylvie Poirier (12 89)**
Diffusion librairies **DIF'POP', Tél. : 01 40 24 21 31 Fax : 01 40 24 15 88**

Directrice commerciale publicité et développement **Caroline Nourry (13 96)**
Directeurs de clientèle **Antoine Faure (12 57)**, **Eddie Barazzuol (12 12)**
Responsable de clientèle secteur culture **Françoise Hullot (12 13)**

Imprimerie **G. Canale & C.**, Via Ligutia 24, 10071 Borgaro (TO), Italie.
Dépôt légal à parution.

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Contrôlée 2011

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L 122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (C.F.C., 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). Utilisez s'abstenir à réaliser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire : 0914 K 85863 – ISSN 0029 5671

éditorial

Malnutrition

PAR **Aline Richard**
directrice de la rédaction

Publiée par le journal The Lancet *en pleine trêve des confiseurs, l'information est passée relativement inaperçue. Pourtant, c'est une première dans l'histoire de l'humanité : l'obésité et les maladies associées tuent désormais davantage que la sous-nutrition. Un rapport sur l'état de santé du monde piloté par l'université de Washington, qui a impliqué 500 chercheurs dans une cinquantaine de pays, l'affirme : si la lutte contre la faim dans le monde a fait considérablement chuter la mortalité infantile à moins d'un million de morts en 2010, à l'inverse, les décès causés par une alimentation en excès, riche en sucre, en sel et en graisses ont atteint, pour la même année, 3,4 millions dans les pays développés* [1]. *Les pays du Sud suivent la tendance, et la dépassent, avec, par exemple, 40 % de femmes obèses recensées en Tunisie. Au total, selon l'Organisation mondiale de la santé, 65 % de la population mondiale vit dans des pays où le trop-plein alimentaire tue plus sûrement que le manque. Obésité, hypertension, maladies cardio-vasculaires, diabète... Ces maladies en partie liées à notre alimentation sont à l'origine de décès, mais aussi de handicaps divers qui minent l'existence de millions de personnes et coûtent très cher aux systèmes de protection sociale. Alors que l'espérance de vie progresse dans le monde, les kilos en trop font pencher la santé du mauvais côté de la balance.*

[1] «The Global Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors», Étude 2010.

© PHOTO DAHMANE

La Recherche

N° 472
Février
2013

La Recherche
est publiée par
Sophia publications,
filiale d'Artémis.

En couverture :
© ANIMEA, F. DURILLON
POUR LE LSCE CEA/CNRS/
UVSQ

Offre d'abonnement: p. 95

Ce numéro comporte un encart La Recherche sur les ventes France et export (hors Belgique et Suisse), un encart Edigroup sur les ventes Belgique et Suisse, un encart Matière de vie sur une sélection d'abonnés.

actualités

8 **L'événement**

Un cerveau artificiel ultraperformant

Un cerveau artificiel a reproduit un comportement complexe, grâce à 2,5 millions de « neurones » au fonctionnement proche des nôtres. De quoi en apprendre davantage sur notre propre matière grise.

3 **Éditorial**

6 **Courrier**

12 **Astres**
> De la glace sur Mercure
> Astrophysique : un trou noir cent fois plus massif que prévu

14 **Matière**
> Refroidir des molécules polyatomiques
> Structure : les composés hydrophobes organisent l'eau localement

16 **Terre**
> Climatologie : la fréquence des sécheresses évolue peu
> Le delta du Nil menacé par le poids de ses sédiments

18 **Mathématiques**
> Comment vibrent les espaces abstraits issus de l'arithmétique

20 **Vie**
> Paléontologie : le plus proche parent des dinosaures
> Des arbres à la limite de leur résistance au dessèchement

22 **Archéologie**
> La plus ancienne image d'un pharaon
> Antiquité : le premier port de Rome vient d'être localisé

24 **Cerveau**
> Psychologie : regarder le visage d'autrui ne permet pas de reconnaître ses émotions

26 **Populations**
> Fertilité : la qualité du sperme français est-elle en baisse ?

28 **Santé**
> Une femme sur trois traitée inutilement aux États-Unis
> Greffe de rein : un mécanisme de rejet vient d'être identifié

30 **Technologie**
> Armement : un drone intégralement conçu grâce à des simulations numériques
> S'achemine-t-on vers des transistors 1 000 fois plus rapides ?

32 **À surveiller**

34 **Acteurs**

Cahier spécial p. 65

Recyclage
réalisé avec le soutien de l'ADEME et des CRITT Matériaux Alsace.

www.larecherche.fr

POUR RECHERCHER
> Les archives du magazine : trouvez les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles

POUR S'INFORMER
> L'actualité de la recherche, le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques

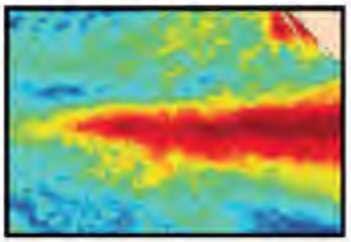
POUR ACHETER
> Abonnement et vente d'anciens numéros
> Livres sélectionnés par *La Recherche*, outils du chercheur

La Recherche sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies **http://twitter.com/maglarecherche**

savoirs

36 **Dossier**

Réchauffement climatique : ce qui nous attend vraiment



Les prévisions que publiera dans quelques mois le GIEC sur le changement climatique, fondées sur des modèles toujours plus complets, confirment la responsabilité humaine dans ces changements, au grand dam des « climatosceptiques ». Que dit vraiment la science ? Et de quelles preuves dispose-t-on ?

38 Valérie Masson-Delmotte : « On peut encore limiter la hausse à 2 °C »
propos recueillis par Denis Delbecq

40 Une meilleure modélisation du climat par Denis Delbecq

44 Répit pour la température globale
par Fabienne Lemarchand

46 Quelles émissions de gaz à effet de serre faut-il réduire ?
par Benjamin Dessus, avec Bernard Laponche et Hervé Le Treut

52 **Technologie**
Une nouvelle génération de cellules photovoltaïques
par Myriam Paire, Jean-François Guillemoles et Daniel Lincot

56 **Neurosciences**
Comment les astrocytes contrôlent les neurones
par Stéphane Oliet et Thomas Papouin

60 **Astrophysique**
Simuler le champ magnétique du Soleil par Sacha Brun

72 **Portrait Ange Nzihou**
« Les déchets sont sources de richesse » par Jean-François Haït

idées

76 **L'entretien du mois** avec Dominique Kerouedan
« Je souhaite faire de la santé une question politique »
propos recueillis par Nicolas Chevassus-au-Louis

80 **Déchiffrage**
Des grands patrons à 2,47 millions d'euros
par Hervé Le Bras

81 **Le grand débat**
Faut-il accroître le parc éolien ?
avec Rémi Chabrillat et Jacques Treiner

84 **Question d'éthique**
Les brevets sur les gènes devant la Cour suprême
par Cécile Klingler

86 **L'invité** Barbara Hendricks
Je ne suis pas scientifique mais...
propos recueillis par Lise Loumé

92 **Histoire de science**
La Lune est-elle fille de la Terre ?
par Marie-Christine de La Souchère

87 **Les livres**
96 **L'agenda**
98 **Curiosités**

Protocoles de test

2 • Les effets toxiques impossibles à prouver

OUI, LES OGM SONT DES POISONS !

L'INTOXICATION MÉDIATIQUE

En lisant votre dossier sur les OGM *(La Recherche n° 470)*, on apprend p. 43 que les résultats de Gilles-Éric Séralini ont été réfutés, car ses groupes de 10 rats ne permettaient pas de conclure quoi que ce soit d'un point de vue statistique. Puis, p. 50, on apprend que l'évaluation des OGM doit se faire, *« pour être statistiquement valable »*, sur au moins 10 animaux par groupe et par sexe, c'est-à-dire la même statistique que Gilles-Éric Séralini… Comment peut-on alors se fier à ces contrôles si aucune statistique fiable n'est possible dessus ?

• *Courriel de Grégoire Martinon*

Réponse de la rédaction

Il n'y a pas de contradiction entre ces deux articles : dans le premier cas, nous parlons d'un essai de toxicité chronique, de deux ans. Dans le second cas, il s'agit d'essais de toxicité subchronique, de trois mois. Or, un protocole valable pour un essai de trois mois (au moins 10 animaux par sexe et par groupe) ne peut être transposé tel quel à un essai de deux ans, d'où la critique adressée à l'étude de Gilles-Éric Séralini. Il faut en effet qu'un nombre suffisant d'animaux parvienne à un âge avancé pour que les observations effectuées à cet âge puissent être analysées de façon statistiquement pertinente. Pour les essais de toxicité chronique, les lignes directrices de l'OCDE recommandent 20 animaux par sexe et par groupe. Et pour les études de cancérogenèse, 50 animaux par sexe et par groupe. Qui plus est, on peut être amené à augmenter ces chiffres, en fonction des caractéristiques de la souche de rat utilisée.

L'intérêt économique des OGM

Le dossier « OGM, vérités et mensonges » (*La Recherche n° 470*, p. 38) me semble incomplet, car je n'y retrouve pas ce qui me rend opposant aux OGM dans le contexte actuel. Mon opposition est économique, aspect absent du dossier. Le soja résistant à un herbicide est la propriété de Monsanto. Il nécessite la pulvérisation de Roundup (de Monsanto). Cultivé sur des surfaces énormes, il devient le seul soja existant. C'est une double atteinte à la biodiversité, celle du soja lui-même et celle de tous les organismes vivants qu'il détruit dans le sol et autour de lui. De plus, ce soja nécessite de racheter (à Monsanto) les semences chaque année. Par ailleurs, la protection par le gène implanté devient inopérante. Comme dans le cas des antibiotiques, la nature est en train de trouver la parade pour s'attaquer à la nouvelle variété transgénique. Les OGM aujourd'hui n'ont d'intérêt économique que pour Monsanto et représentent de graves dangers.

• *Courriel de Gérard Crouzet*

Réponse de la rédaction

L'angle de ce dossier n'est effectivement pas économique : face à la polémique suscitée par la publication de l'article de Gilles-Éric Séralini, nous souhaitions principalement présenter à nos lecteurs un état des lieux concernant l'évaluation sanitaire des OGM, de façon qu'ils puissent se forger leur propre opinion à ce sujet. Nous avons cependant pris soin de ne pas passer sous silence l'importance des questions agronomiques et économiques. Dans son interview, Francis Chateauraynaud le dit sans ambiguïté : *« Les rapports de forces entre les filières et les modèles agricoles, le fonctionnement des marchés et la concurrence entre firmes sont au cœur de ce dossier. »* Le second article rappelle que la question de fond concernant les OGM actuellement commercialisés est certainement celle du type d'agriculture que l'on souhaite. Ce dernier point a déjà fait l'objet, directement ou indirectement, de plusieurs articles dans *La Recherche* – les références d'une partie d'entre eux figurent à la fin du dossier.

Risque de démence

Les benzodiazépines, dont il est question dans l'article « Les benzodiazépines favoriseraient la maladie d'Alzheimer » (*La Recherche n° 470*, p. 29), ne sont en aucun cas des traitements antidépresseurs. L'étude citée établit une association statistique entre la prise de ces médicaments et le risque de démence, mais ne permet pas d'en déduire une relation causale. Rien n'exclut la précession de la dépression sur la démence, d'autant plus que l'association est bien connue. Le risque de démence n'est-il pas lié à la dépression qui cause les signes que l'on « traite » par benzodiazépines ?

• *Courriel de Bernard Maroy*

Réponse de Bernard Bégaud

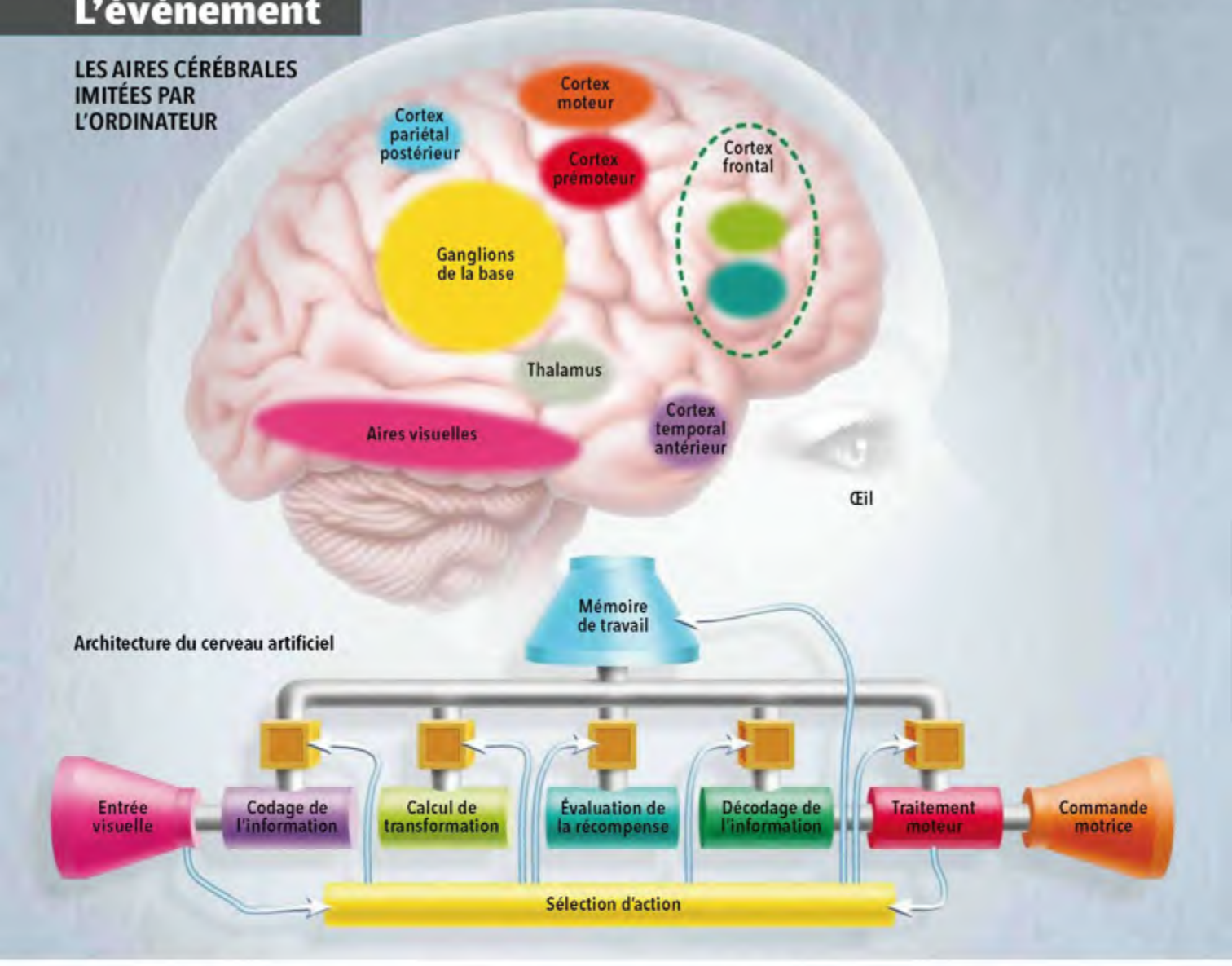
Les benzodiazépines sont assez largement prescrites chez des patients déprimés, ne serait-ce (à tort) que pour traiter une composante anxieuse de cette maladie. Notre étude a été bâtie pour minimiser le biais que vous évoquez : que les benzodiazépines seraient prescrites à cause des signes avant-coureurs de la démence, comme la dépression et les troubles du sommeil. Nos résultats ne vont pas dans ce sens. La prise en compte de la dépression dans l'analyse ne change pas les résultats, et l'on sait que les signes avant-coureurs sont d'autant plus fréquents que l'on se rapproche du diagnostic de démence. Si la prescription de benzodiazépines était motivée par ceux-ci, son association avec la démence serait d'autant plus forte que l'on se rapproche de la date du diagnostic. C'est justement l'inverse que nous observons : le risque majoré de démence chez les consommateurs de benzodiazépines ne s'observe que cinq à huit ans après le début du traitement.

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

CONTACT PUBLICITAIRE : ANTOINE FAURE 01 44 10 12 57

L'événement

LES AIRES CÉRÉBRALES IMITÉES PAR L'ORDINATEUR



Architecture du cerveau artificiel

Un cerveau artificiel ultraperformant

Par **Denis Delbecq,** journaliste.

Pour la première fois, un cerveau artificiel a reproduit un comportement complexe, grâce à 2,5 millions de « neurones » au fonctionnement proche des nôtres. De quoi en apprendre davantage sur notre propre matière grise.

À l'écran, des séries de chiffres défilent… 1, 2, 3, 4, 5, 6. 3, 4… cette fois, c'est un point d'interrogation qui clôt la série. Une main malhabile trace un 5. Bonne réponse !

La scène pourrait se dérouler dans n'importe quelle école maternelle. Sauf que ce n'est pas un être humain qui passe ce test rudimentaire. C'est un

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

© UNIVERSITÉ DE WATERLOO

Chris Eliasmith (ci-dessus) et son équipe de l'université de Waterloo, au Canada, ont mis au point un cerveau artificiel baptisé Spaun. Son architecture (schéma du bas) est fondée sur celle du cerveau humain (schéma du haut). On y retrouve les principales structures cérébrales (en couleurs), sous forme de regroupement de neurones artificiels. Ces derniers sont connectés de manière à imiter le fonctionnement du cerveau. Cela permet à Spaun de reconnaître une image, de la mémoriser et de la décoder afin de commander le mouvement d'un bras robotisé.

programme informatique mis au point par l'équipe de Chris Eliasmith, du centre de neurosciences théoriques de l'université de Waterloo, au Canada.

Ce simulateur reproduit et coordonne le fonctionnement de deux millions et demi de neurones virtuels, inspirés des vrais. C'est peu, comparé aux quelque cent milliards qui peuplent notre cerveau. Mais c'est bien la première fois qu'un « cerveau artificiel » reproduit ainsi un comportement complexe. Il voit, mémorise, déduit, et communique sa réponse en dessinant avec un bras robotisé.

Ce simulateur baptisé Spaun (acronyme anglais de réseau unifié d'architecture de pointeurs sémantiques) vient d'être présenté dans la revue *Science* [1]. Ses neurones virtuels, codés dans une mémoire informatique, peuvent conserver des informations et les transmettre à leurs voisins. Ils sont regroupés de manière à simuler plusieurs aires fonctionnelles du cerveau humain. *« Nous avons assemblé différents modèles qui correspondent à différentes fonctions cérébrales, par exemple pour mémoriser l'information ou reconnaître des images,* explique Chris Eliasmith. *L'ensemble est capable de simuler un comportement. »*

Les quelques expériences de cerveau virtuel réalisées précédemment n'étaient pas allées aussi loin. En novembre dernier, la société IBM a ainsi exécuté la plus grande simulation jamais tentée. L'équipe du projet Synapse, financé par l'organisme de recherche du ministère américain de la Défense, a connecté plus de cinq cents milliards de neurones informatiques, mais sans produire la moindre once de comportement [2]. Il s'agissait seulement de démontrer qu'on peut relier un très grand nombre de neurones virtuels pour tenter de reproduire la complexité des connexions dans le cerveau humain. De son côté, avec deux cent mille fois moins de cellules nerveuses, Spaun accomplit huit tâches distinctes, à partir des images de chiffres qu'on lui présente.

L'essentiel

- **UNE ÉQUIPE CANADIENNE** a simulé un cerveau humain par ordinateur.
- **CELUI-CI PEUT COMPTER,** reconnaître des chiffres et les écrire à l'aide d'un bras robotisé.
- **CE TYPE DE PERFORMANCE** permet de tester des modèles de fonctionnement de notre propre cerveau.

Reconnaître et dessiner. Il peut notamment reconnaître un chiffre et le dessiner. Il sait aussi mémoriser une liste de longueur arbitraire, la reproduire ou dire à quelle position de la liste se trouve un élément donné, et répondre à un test élémentaire de logique. *« Ces travaux montrent que les connaissances acquises sur les réseaux de neurones réels et virtuels permettent aujourd'hui de reproduire des comportements subtils,* analyse Stanislas Dehaene, du Collège de France et de l'unité de neuro-imagerie cognitive de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale et du CEA. *L'utilisation dans Spaun d'un modèle de compression de l'image pour en extraire les caractéristiques significatives fournit un modèle intéressant de la manière dont notre cerveau tire du sens des informations qu'il reçoit. »*

Côté performances, nous n'avons rien à craindre de Spaun. Compte tenu de la complexité des calculs, et en dépit des plus de dix mille microprocesseurs utilisés, il lui faut deux heures et demie pour simuler ce qui se passe dans un vrai cerveau en une seule seconde. Toutefois, si l'on prend comme unité de temps la réactivité d'un neurone individuel, ses millions de neurones semblent, collectivement, avoir le même rythme de réaction que nous aux stimuli visuels.

Et ce n'est pas le seul point commun entre notre matière grise et le logiciel. Celui-ci reproduit aussi certains de nos défauts. Ainsi, il se rappelle mieux le premier et le dernier chiffre d'une longue série, au détriment de ceux qui se trouvent au milieu de la liste. >>>

Un cerveau artificiel ultraperformant

>>> En revanche, Spaun ne peut accomplir que les exercices pour lesquels il a été programmé à l'avance. Il n'est pas doté de la capacité d'apprendre. *« La principale critique qu'on pourrait lui faire est son mode de fonctionnement un peu caricatural,* explique Stanislas Dehaene. *Spaun ne fait rien d'autre que réagir à un stimulus, à un ordre qu'on lui donne. Un vrai cerveau se fixe ses propres objectifs, et va ensuite chercher les informations en lui-même ou à l'extérieur pour les atteindre. »*

Selon Chris Eliasmith, bien que cette simulation soit rudimentaire, il y a beaucoup à en apprendre. *« On pourrait réaliser les mêmes fonctions avec des outils informatiques beaucoup plus simples et rapides. Mais nous n'apprendrions rien sur le cerveau. La simulation vise par exemple à expliquer les différences de performance de la mémoire d'un individu à l'autre. Ou, en éliminant des neurones, de voir l'effet du vieillissement sur les performances cérébrales. »* Stanislas Dehaene concède également qu'*« il faut voir ce travail comme une preuve de principe. Les études sur le cerveau ont besoin de théoriciens et de modèles. Et pour ces modèles, la preuve viendra de notre capacité à simuler les comportements ».*

Ces travaux s'inscrivent dans un ensemble de recherches au carrefour des neurosciences et de l'informatique qui se développent aujourd'hui. L'objectif est à la fois de mieux comprendre notre cerveau et d'améliorer les performances des ordinateurs. Les spécialistes européens comptent bien prendre toute leur place dans ces efforts.

Simuler l'apprentissage. Une douzaine d'universités et d'organismes de recherche, rassemblant des centaines de chercheurs venus des neurosciences, de la médecine et de la biologie, des spécialistes de l'éthique, des mathématiciens, des informaticiens et des électroniciens, se sont regroupés dans le Projet cerveau humain (HBP selon son sigle en anglais) [3]. Leur objectif, à terme, est de créer un simulateur cérébral complet. Une demande de financement de 1 milliard d'euros a été déposée en octobre 2012 auprès de l'Union européenne.

« Il s'agit d'abord de rassembler l'ensemble des connaissances sur le cerveau, qui sont aujourd'hui très morcelées, explique Stanislas Dehaene, *qui y participe. Ensuite, nous tenterons d'établir des modèles, des algorithmes de fonctionnement des réseaux de neurones, capables de relier ce qui se passe aux différentes échelles, celles du gène, des cellules et de leur diversité, jusqu'au cerveau tout entier, pour construire des simulations aussi proches que possible de la réalité. »*

Le succès passera impérativement par des progrès théoriques, et par la mise au point de nouveaux concepts de puces électroniques. Au-delà de révolutionner les neurosciences, celles-ci devraient aussi décupler la puissance de nos appareils quotidiens. *« Aujourd'hui, il faut à Spaun des heures pour simuler ce qui se passe dans notre cerveau en une seconde. Il nous faudra des outils capables de faire la même chose en quelques millièmes de seconde seulement. C'est la condition pour être capable de simuler l'apprentissage au cours des premières années de la vie »,* prévient Stanislas Dehaene.

Ce n'est donc pas un hasard si la codirection du HBP a été confiée à un duo, formé par le théoricien des neurosciences Henry Markram, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, et l'électronicien Karlheinz Meier, de l'université de Heidelberg, en Allemagne. Ce dernier conçoit une puce à neurones artificiels qui ne manipule pas des 0 et des 1, comme dans l'informatique ordinaire, mais des signaux analogiques qui imitent à merveille les signaux électriques des neurones biologiques. Dans la liste des collaborateurs du HBP, on note aussi la présence de Steve Furber, de l'université de Manchester, au Royaume-Uni, qui propose sa propre architecture de neurones en silicium. C'est le père des puces « ARM » qui animent la majorité des téléphones portables haut de gamme et des tablettes. Sa recette ? Beaucoup de puissance et une faible consommation d'énergie. Un excellent point de départ pour imiter notre cerveau, dont les prouesses ne nécessitent qu'une puissance de 20 watts, cinq fois moins que le microprocesseur d'un ordinateur de bureau. ■

[1] C. Eliasmith *et al.*, *Science*, 338, 1202, 2012
[2] http://bit.ly/IBMSynapse
[3] www.humanbrainproject.eu

Des neurones qui imitent les vrais

Le simulateur de cerveau Spaun reproduit dans une mémoire informatique la physiologie des neurones, des synapses, leurs connexions et de la neurotransmission des informations. Chaque neurone virtuel est, comme un neurone réel, caractérisé par un potentiel électrique. Lorsque celui-ci dépasse un certain seuil, un signal est transmis aux neurones connectés. Les millions de neurones virtuels de Spaun sont connectés et regroupés de manière à imiter les différentes aires cérébrales impliquées dans les processus de reconnaissance d'image, de mémoire à court terme, de transformation et de calcul, ainsi que dans la motricité. La reconnaissance des informations visuelles se fait en plusieurs étapes successives, comme dans un cerveau humain : les informations inutiles ou redondantes sont d'abord éliminées ; seul l'essentiel est conservé, ce qui détermine l'information contenue dans l'image. À l'autre bout de la chaîne, l'aire motrice simulée contrôle les mouvements complexes d'un bras robotisé, qui sont décrits comme une succession de mouvements élémentaires.

En kiosque à partir du 7 février

Les dossiers **Santé**

En collaboration avec LA Recherche

NOUVEAU N°1

100 IDÉES REÇUES SUR LA SANTÉ dont il faut se méfier

- Alimentation
- Addictions
- Sommeil
- Grossesse
- Hérédité
- Médicaments
- Cerveau
- Vie sexuelle
- Longévité
- Enfants
- Traitements

M 03166 - 1 H - F: 5,90 € - RD

L'aspirine diminue les risques de cancer • Sous hypnose on peut se faire arracher une dent sans souffrir • La pillule fait grossir • Après un régime on regrossit toujours • On peut devenir accro au sucre • Priver quelqu'un de sommeil le rend fou • Les téléphones portables sont nocifs pour le cerveau • Demain on vivra 120 ans ?

En bref

DES GRAINS DE POUSSIÈRES AUTOUR D'UNE NAINE BRUNE

Grâce au radiotélescope ALMA installé au Chili, une équipe internationale a identifié la présence de grains de poussières de taille millimétrique dans le disque de matière entourant la naine brune ISO-Oph 102, étoile avortée de 60 fois la masse de Jupiter. Jusqu'alors, ces grains solides, à partir desquels peuvent se former des planètes, n'avaient été observés qu'autour de jeunes étoiles. La découverte laisse supposer que les disques entourant les naines brunes sont plus semblables à ceux entourant les jeunes étoiles que prévu, et que de tels astres sont susceptibles d'engendrer eux aussi des planètes.

L. Ricci *et al.*, *ApJ*, 761, L20, 2012.

MAKÉMAKÉ PRIVÉE D'ATMOSPHÈRE

La planète naine Makémaké, objet glacé situé aux confins du système solaire, troisième en taille, après Éris et Pluton, est dénuée d'atmosphère. C'est ce que révèlent les observations d'une équipe internationale menées à la faveur de l'occultation d'une étoile par la planète naine. Jusque-là, la taille de Makémaké (deux tiers de celle de Pluton) et la composition de sa surface semblaient en faire un candidat pour retenir une atmosphère similaire à l'enveloppe gazeuse de Pluton. Ces mesures ont permis de déterminer sa taille : Makémaké est un corps allongé de 1 430 kilomètres sur 1 502 kilomètres.

J. L. Ortiz *et al.*, *Nature*, 491, 566, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/nasa-moon-2013

Ce site permet de visualiser les phases de la Lune en 2013 selon le jour et l'heure de son choix.

De la glace sur Mercure

PLANÉTOLOGIE

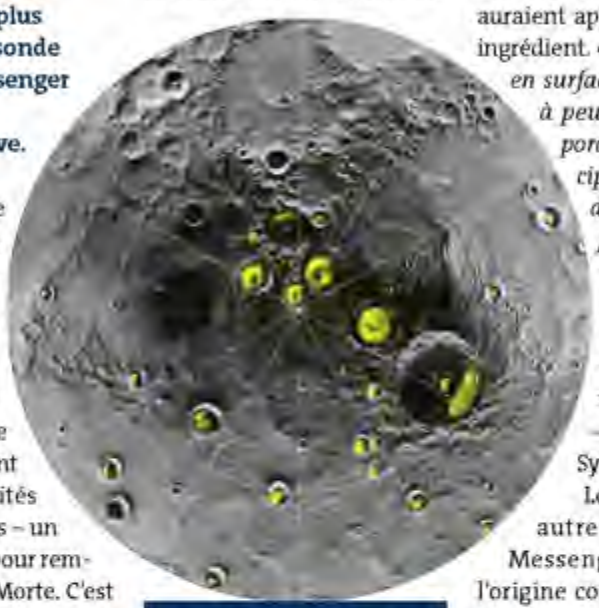
Les astronomes suspectaient la présence de glace aux pôles de Mercure depuis plus de vingt ans. La sonde américaine Messenger vient enfin d'en apporter la preuve.

La planète Mercure, la plus proche du Soleil, dénuée d'atmosphère, et où la température peut dépasser 400 °C le jour, recèle pourtant de grandes quantités de glace à ses pôles – un volume suffisant pour remplir d'eau la mer Morte. C'est la découverte que viennent de faire une équipe franco-américaine grâce aux observations de la sonde de la NASA Messenger [1].

Aussi surprenante soit-elle, la présence de glace sur Mercure était suspectée depuis longtemps par les astronomes.

« La planète est parsemée de cratères d'impact et, comme son axe de rotation est perpendiculaire au plan de son orbite autour du Soleil, certains cratères situés aux pôles ne voient jamais la lumière et sont donc susceptibles de renfermer de la glace », explique Sylvestre Maurice, de l'institut de recherche en astrophysique et planétologie, à Toulouse, un des auteurs de la découverte.

Un premier indice arrive en 1992. Le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico repère alors des taches brillantes dans les cratères des régions polaires. Cette observation est compatible avec la présence de glace dont la surface réfléchirait fortement le signal radar envoyé par le télescope. Mais le doute subsiste encore : des dépôts de soufre pourraient tout aussi bien expliquer ces zones brillantes.



De grandes quantités de glace sont localisées dans des cratères d'impact (en jaune) près du pôle Nord de Mercure, reconstitué ici à l'aide d'images envoyées par la sonde Messenger.

Origine cométaire. Grâce à Messenger, le doute n'est plus permis. *« Son spectromètre à neutrons a mesuré un excès d'hydrogène dans ces mêmes cratères,* confie Sylvestre Maurice. *La seule explication possible est la présence d'eau glacée. »* D'après les données de l'instrument, une petite partie de la glace se trouve en surface, la très grande majorité étant enterrée à une dizaine de centimètres dans le sol.

Mais comment cette glace est-elle arrivée là ? Comme toutes les autres planètes du système solaire, Mercure a été bombardée depuis sa naissance par de nombreuses comètes et astéroïdes dont on sait qu'ils contiennent de l'eau : ce seraient donc eux qui auraient apporté le précieux ingrédient. *« Une fois déposée en surface, l'eau s'est peu à peu déplacée, s'évaporant le jour et précipitant sous forme de glace la nuit, jusqu'à être prise au piège dans les cratères des pôles en permanence à l'ombre, où la température est de –200 °C »*, explique Sylvestre Maurice.

Les données d'un autre instrument de Messenger confirment l'origine cométaire de cette glace. Le spectromètre infrarouge révèle en effet que le matériau sous lequel la glace est enfouie est plus sombre que dans d'autres régions de la planète. Explication possible : cette couche serait constituée de composés carbonés apportés par les comètes et mélangés à l'origine avec la glace [2].

D'après les chercheurs, cette glace serait relativement jeune, moins d'un milliard d'années, auquel cas elle aurait été enterrée sous une couche de poussières beaucoup plus épaisse par les impacts incessants de petits objets. *« Grâce à cette découverte, on va pouvoir retracer l'histoire récente des impacts sur Mercure et dans le système solaire de manière plus large »*, se réjouit Sylvestre Maurice. ■ **Julien Bourdet**

[1] D. Lawrence *et al.*, *Science*, doi: 10.1126/science.1229953, 2012.
[2] D. Paige *et al.*, *Science*, doi: 10.1126/science.1231106, 2012.

© NASA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON/NATIONAL ASTRONOMY AND IONOSPHERE CENTER, ARECIBO OBSERVATORY

ASTROPHYSIQUE *Un trou noir cent fois plus massif que prévu*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Frédéric Bournaud est astrophysicien au CEA, spécialiste de la formation des trous noirs supermassifs.

Un trou noir pesant 17 milliards de fois la masse du Soleil vient d'être découvert par une équipe germano-américaine dans une galaxie proche. En quoi est-ce important ?

F.B. Ce trou noir est le deuxième plus gros jamais découvert à ce jour. Il fait partie de la catégorie des « supermassifs », trous noirs géants situés, pense-t-on, au centre de la plupart des galaxies. Mais le résultat le plus important ici, c'est que cet objet est plus de 100 fois plus massif qu'il ne devrait l'être si on compare sa masse à celle de sa galaxie, NGC 1277. En effet, jusqu'à aujourd'hui, toutes les observations ont montré qu'en moyenne un trou noir supermassif représente 0,1 % de la masse de la galaxie qui l'héberge. Or, pour ce trou noir, c'est 14 % [1] !

Comment a-t-on pu déterminer sa masse ?

F.B. C'est le mouvement des étoiles situées à la périphérie du trou noir qui a révélé sa masse. Les chercheurs ont mesuré avec précision la vitesse de ces étoiles. Ils ont alors constaté qu'elles tournaient beaucoup plus vite que dans d'autres galaxies, preuve que le trou noir est extrêmement massif.

Cette découverte implique de revoir les modèles de formation des trous noirs supermassifs

Qu'implique ce résultat ?

F.B. Qu'il va falloir revoir nos modèles de formation des trous noirs supermassifs. Le mécanisme précis est encore mal compris, mais on pense que de tels objets se sont formés à partir d'un petit trou noir – de 10 000 fois la masse du Soleil au maximum – provenant de l'effondrement d'une étoile ou d'un amas d'étoiles. Ensuite, le trou noir a grossi lentement en avalant de la matière de sa galaxie. Mais jusqu'à un certain point : à un moment donné, le trou noir génère un rayonnement si puissant qu'il balaye le gaz à l'extérieur de la galaxie, mettant ainsi un terme à la fois à la chute de la matière qui l'alimentait jusqu'ici et à la formation de nouvelles étoiles dans la galaxie. Ce phénomène permet de comprendre pourquoi le trou noir devrait toujours représenter une petite fraction de la masse de la galaxie. La découverte du trou noir de NGC 1277 signifie donc que ces colosses peuvent absorber beaucoup plus de matière qu'on l'imaginait jusqu'ici. Ou encore que les graines qui leur donnent naissance peuvent être beaucoup plus grosses qu'on ne le pensait.

Y a-t-il d'autres explications possibles ?

F.B. Oui. On peut notamment faire l'hypothèse que NGC 1277 a été l'objet de très nombreuses collisions avec d'autres galaxies tout au long de son évolution. On pense que les trous noirs grossissent énormément lors de ces événements violents. Seul problème : les observations montrent que NGC 1277 contient des étoiles âgées de plus de 8 milliards d'années en majorité. Aucune collision n'a donc visiblement fait évoluer la galaxie depuis cette époque. Ce trou noir n'a pas fini d'intriguer les astronomes. ■

Propos recueillis par J.B.

[1] R. van den Bosch *et al.*, *Nature*, 491, 729, 2012.

zoom Cyclone sur Saturne

Cet impressionnant cyclone a été photographié le 27 novembre dernier au pôle Nord de Saturne par la sonde américaine Cassini, alors à 400 000 kilomètres de la planète géante. L'image rappelle celles des ouragans observés sur Terre, mais le phénomène est sans commune mesure : le vortex saturnien a un diamètre de 4 000 kilomètres, soit quatre fois la taille des plus grands cyclones terrestres, et les vents s'y déplacent à plus de 500 kilomètres par heure, plus de deux fois plus vite que sur notre planète. Ce gigantesque tourbillon tirerait son énergie des violents orages qui naissent en profondeur dans l'atmosphère de Saturne. En 2006, Cassini avait découvert un autre cyclone, plus grand encore, situé cette fois au pôle Sud de la planète aux anneaux.

© NASA/JPL-CALTECH/SPACE SCIENCE INSTITUTE

En bref

LASER ULTRA-INTENSE

Un faisceau de rayons X ultra-intense a permis de révéler la structure atomique d'une enzyme indispensable à la survie du parasite unicellulaire *Trypanosoma brucei*, responsable de la maladie du sommeil. Les physiciens ont d'abord surexprimé l'enzyme dans des cellules, pour former des cristaux. Problème : ces derniers étaient trop petits (quelques micromètres de long) pour être observés par le rayonnement X d'un synchrotron, instrument utilisé dans ce type de recherche. Les physiciens ont donc eu l'idée d'utiliser un laser à rayons X un milliard de fois plus intense. C'est en associant les résultats de 178 875 impulsions de ce rayon (chaque impulsion détruit un échantillon) qu'ils ont déterminé la structure de l'enzyme.

L. Redecke et al., doi: 10.1126, Science, 1229663, 2012.

TRAJECTOIRES INATTENDUES

L'équipe travaillant sur le détecteur CMS du CERN a observé un résultat imprévu lors de collisions entre des protons et des ions de plomb. D'ordinaire, les particules issues de ces collisions partaient dans des directions différentes. Cette fois, dans les 2 millions de collisions analysées, les physiciens ont constaté que certaines particules s'éloignaient en suivant la même direction. D'après eux, cela pourrait signifier qu'elles sont associées par un phénomène quantique appelé l'intrication.

CMS Collaboration, Phys. Lett. B, sous presse, 2012.

sur le web

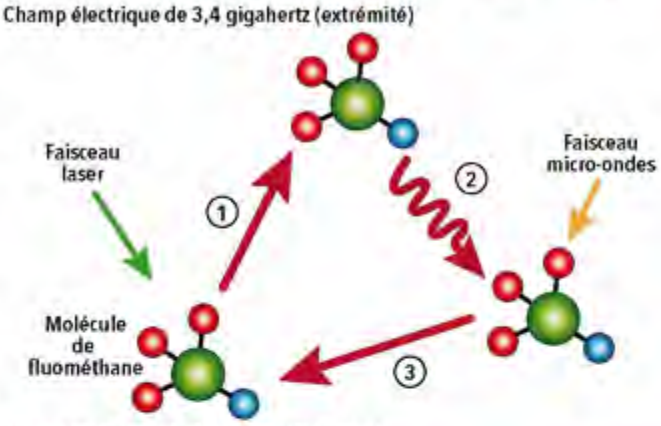
http://tinyurl.com/combustion-nano

La vidéo, tournée avec une caméra à très haute vitesse, montre, pour la première fois, la synthèse de nanoparticules par combustion.

Refroidir des molécules poly

PHYSIQUE

Une équipe allemande a refroidi des molécules composées de cinq atomes à une température proche du zéro absolu. Une première mondiale.



Un faisceau laser excite la molécule, qui se déplace vers l'extrémité du dispositif (1), où le champ électrique est si fort qu'elle est repoussée, perd de son agitation et se refroidit (2). Puis un faisceau micro-ondes permet de la ramener au centre (3) pour un nouveau cycle. SOURCE : NATURE

On sait refroidir un gaz d'atomes, c'est-à-dire les faire ralentir jusqu'à presque figer leur mouvement. Mais refroidir un gaz de molécules est bien plus complexe. L'affaire se corse encore quand on parle de molécules constituées d'au moins trois atomes. Pourtant, Martin Zeppenfeld et ses collègues de l'institut Max Planck pour l'optique quantique, à Garching, en Allemagne, sont parvenus à refroidir des molécules de fluorométhane, formées de cinq atomes, à une température de 29 millikelvins [1]. Cette performance représente une étape importante vers une meilleure compréhension des

STRUCTURE Les composés hydrophobes orga

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Daniel Bonn est directeur de recherche CNRS à L'École supérieure de chimie, à Paris (ParisTech).

Une équipe américaine vient de déterminer comment les molécules d'eau s'organisent autour de molécules hydrophobes plongées dans ce liquide [1]. En quoi est-ce important ?

D.B. C'est une question cruciale parce que beaucoup de nos protéines contiennent à la fois des parties qui aiment être dans l'eau et d'autres qui la repoussent. Cette interaction entre l'eau et les groupements hydrophobes est l'une des forces motrices les plus importantes dans la nature, par exemple pour le repliement des protéines et l'autoassemblage des membranes de cellules. La grande question à laquelle cette équipe répond partiellement est de savoir si l'eau autour de ces groupements hydrophobes a une structure organisée ou non.

Qu'en savait-on avant ces expériences ?

D.B. On avait démontré dans les années 1940 que la présence de groupements hydrophobes dans l'eau diminuait le « désordre ». Cela suggérait une organisation locale se rapprochant de celle d'un cristal. Des chercheurs avaient essayé d'appliquer au mélange molécules hydrophobes-eau la diffraction des neutrons, l'une des méthodes employée pour déterminer la structure des cristaux. Mais ils n'avaient pas trouvé de structure. Cela pouvait toutefois signifier que l'organisation n'est que très locale. Car pour faire de la diffraction, il faut une structure ordonnée sur une grande échelle.

Cette publication a-t-elle permis de dissiper les apparentes contradictions ?

D.B. En quelque sorte, oui. Joel Davis et ses collègues, de l'université Purdue, aux États-Unis, démontrent qu'il y a bien une structure assez organisée localement mais à si petite échelle que l'on

atomiques

comportements quantiques de la matière.

Pour refroidir un gaz de molécules, on pourrait lui appliquer les techniques utilisées pour les atomes. Parmi elles, le refroidissement laser : *« On utilise deux faisceaux de même longueur d'onde fonctionnant en sens opposé,* explique Daniel Comparat, du laboratoire Aimé-Cotton, à Orsay. *Les impulsions de ces deux faisceaux, envoyées alternativement, corrigent les mouvements des atomes, jusqu'à rendre ces derniers presque parfaitement immobiles. »*

Problème avec les molécules : chaque impulsion du laser pourrait avoir l'effet inverse de celui désiré. *« Une molécule possède en effet des mouvements de rotation et de vibration internes, des atomes les uns par rapport aux autres,* détaille Daniel Comparat. *Chaque impulsion du laser risquerait de les agiter et, donc, de faire monter la température de la molécule au lieu de la faire baisser. »*

Vibration et rotation. Pour obtenir leur résultat, Martin Zeppenfeld et ses collègues ont cherché à utiliser à leur avantage ces mouvements de vibration et de rotation. Ils se sont servis d'un échantillon de gaz contenant un million de molécules de fluorométhane. Le fluorométhane est une molécule polarisée, constituée de 3 atomes d'hydrogène, 1 de carbone et 1 de fluor.

Ils ont d'abord cherché à isoler, entre deux électrodes, les molécules les moins agitées – qui sont donc aussi les plus froides. Entre les deux électrodes circulait un champ électrique de fréquence variable : 1,6 gigahertz au centre, et 3,4 gigahertz aux extrémités.

Puis l'équipe a excité les molécules piégées au centre du champ électrique à l'aide d'un faisceau laser. Ce faisant, elles se sont déplacées vers les extrémités du champ électrique. Là, celui-ci était si fort que les molécules ont été repoussées vers le centre du champ électrique. Au passage, elles ont perdu une partie de leur agitation et se sont donc refroidies.

Grâce à un faisceau de micro-ondes, les physiciens ont ensuite fait revenir les molécules au centre du piège avant de répéter le cycle. Ils ont ainsi réussi, en une vingtaine de secondes, à diminuer la température des molécules de fluorométhane de 390 à 29 millikelvins.

« Ce premier résultat est une très belle preuve de principe », juge Daniel Comparat. La prochaine étape sera de refroidir ces molécules à des températures inférieures au millikelvin. En effet, c'est uniquement au-dessous de ce seuil « ultrafroid » que l'on peut, entre autres, étudier les phénomènes régis par la mécanique quantique. ■

Vincent Glavieux

[1] M. Zeppenfeld *et al.*, *Nature*, 491, 570, 2012.

nisent l'eau localement

peut difficilement parler de structure cristalline. En outre, ils montrent que cette organisation disparaît progressivement lorsque la température augmente (de 0 à 100 °C). Pour arriver à ces résultats, ils ont travaillé avec des molécules d'alcool de différentes longueurs, dissoutes dans l'eau. Un alcool est en effet composé d'un groupement hydrophile contenant un atome d'oxygène, et d'une chaîne d'atomes de carbone hydrophobe. Et plus cette chaîne est longue, plus elle est hydrophobe. Ils ont ainsi estimé que les molécules d'eau sont organisées autour de cette partie hydrophobe sur une distance d'environ un nanomètre, ce qui correspond à seulement quelques molécules.

Quelle technique ont-ils employée ?

D.B. Ils ont utilisé une technique de spectroscopie infrarouge, qui permet de mesurer les énergies de vibration des liaisons à l'intérieur des molécules. Ils ont ainsi observé les liaisons entre les atomes d'oxygène et d'hydrogène des molécules d'eau entourant la partie hydrophobe. Si leur énergie de vibration est faible, la structure est très organisée. C'est effectivement ce qu'ils ont retrouvé, à toute petite échelle. ■ **Propos recueillis par Florence Martinache**

[1] J. G. Davis *et al.*, *Nature*, 491, 582, 2012.

© YONGGANG KE-HARVARD UNIVERSITY

zoom Structures d'ADN en trois dimensions

Ces minuscules objets, de couleur et de forme différentes, sont les représentations numériques de briques d'ADN synthétique en trois dimensions. Elles sont la base de nanostructures qui s'autoassemblent en volume. En tout, l'équipe dirigée par Peng Yin, de l'université Harvard, aux États-Unis, en a produit de 102 formes différentes. Contrairement aux travaux antérieurs, ces briques sont élaborées sur de courts brins d'ADN synthétique. Les brins sont eux-mêmes constitués de 32 nucléotides, constituants élémentaires de l'ADN, répartis en quatre régions de taille équivalente. Ce sont cette disposition et la séquence unique encodée dans chaque brique qui rendent possible l'autoassemblage.

Y. Ke *et al.*, *Science*, 338, 1177, 2012.

En bref

PERTES GROENLANDAISES

Entre 2002 et 2011, la calotte qui recouvre le Groenland a perdu 199,7 milliards de tonnes de glace par an. Pour arriver à ce chiffre, Christopher Harig et Frederik Simons, de l'université de Princeton, aux États-Unis, ont analysé les fines variations de la gravité terrestre mesurées par les satellites de la mission germano-américaine Grace. Les plus grosses pertes sont observées sur les régions côtières du sud-est et du nord-ouest de l'île. En revanche, sur ce laps de temps, le centre de la calotte a gagné en masse.

C. Harig et F.J. Simons, *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1206785109, 2012.

VIEUX GRAND CANYON

Le Colorado aurait commencé à sculpter le Grand Canyon plus tôt que prévu, voilà au moins 70 millions d'années, affirment des géologues américains après avoir daté les grains d'apatite de roches collectées dans l'ouest du canyon. Ce minéral contient de l'uranium radioactif, qui, en se désintégrant, émet de l'hélium. En profondeur, quand les roches du Grand Canyon étaient chaudes, l'hélium s'échappait de l'apatite par diffusion. Sous l'effet de l'érosion, les roches sont peu à peu remontées à la surface et se sont refroidies. L'apatite s'est alors « fermée », piégeant ainsi l'hélium. En mesurant son abondance, les chercheurs ont daté cette « fermeture ». Ils en ont déduit la vitesse à laquelle les roches sont remontées.

R.M. Flowers et K.A. Farley, *Science*, doi: 10.1126/science.1229390, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/climate-changes-2012

http://tinyurl.com/7jyervn

Le rapport de la Commission européenne sur l'étendue des impacts du changement climatique en Europe.

CLIMATOLOGIE

La fréquence des sécheresses évolue peu

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Hervé Douville est responsable de l'équipe variabilité-détection-rétroactions, au Centre national de recherches météorologiques, à Toulouse.

La fréquence des épisodes de sécheresse n'aurait pas augmenté depuis soixante ans, contrairement à ce que le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) avait noté en 2007. Comment s'en est-on aperçu ?

H.D. La sécheresse est un phénomène complexe pour lequel il n'existe pas de définition unique. Ainsi, pour les climatologues, elle correspond à un déficit de précipitations en un lieu donné. Mais pour les agronomes, elle s'exprime par un assèchement des sols lié à une diminution des pluies et à une augmentation de l'évaporation. La manière dont on calcule la gravité d'une sécheresse dépend donc du but poursuivi. Dans son 4e rapport, le GIEC cite ainsi une étude de 2004, qui montrait une augmentation des épisodes de sécheresse au niveau mondial [1]. Celle-ci s'est focalisée sur le déficit d'humidité du sol. Le problème est qu'en l'absence de mesures directes de l'évaporation à l'échelle globale ce déficit est estimé de manière empirique. Cette équipe est parvenue à sa conclusion en se fondant sur un indicateur qui surestime le niveau d'assèchement des sols lié au réchauffement global. En modifiant cet indicateur, Justin Sheffield, de l'université de Princeton, aux États-Unis, et ses collègues, montrent que la sécheresse a peu évolué ces dernières décennies [2].

Qu'est-ce qui distingue ces deux études ?

H.D. En 2004, Aiguo Dai et ses collègues du centre américain de recherches atmosphériques, dans le Colorado, ont utilisé l'indice de sécheresse de Palmer, indicateur calculé sur les différents continents, mois après mois, à partir des précipitations et de l'évaporation potentielle (la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un sol couvert de végétation bien alimenté en eau) déduite de la température en surface. Justin Sheffield et ses collègues ont, eux, repris cet indice, mais en modifiant le mode de calcul de l'évaporation potentielle : ils ont tenu compte de la température mais aussi du rayonnement solaire, du vent et de l'humidité atmosphérique. Sur les soixante dernières années, ils n'observent alors aucune évolution franche de cet indice de sécheresse : globalement, les sécheresses ne semblent ni plus fréquentes ni plus étendues que la normale.

Faut-il alors revoir à la baisse la menace d'un assèchement pour le XXIe siècle ?

H.D. Non, de nombreuses régions des moyennes latitudes connaîtront des sécheresses plus fréquentes, plus sévères et plus longues dans les années à venir [3]. C'est lié à deux phénomènes : d'une part, les concentrations de gaz à effet de serre ne cessent d'augmenter. Ils amplifient l'effet de serre naturel qui provoque un échauffement de la surface. Ce qui peut favoriser l'évaporation, et donc l'assèchement du sol. De plus, les émissions d'aérosols ont baissé ces dernières années. Or, les aérosols compensent l'action des gaz à effets de serre en renvoyant une partie du rayonnement solaire incident vers l'espace, ce qui peut limiter l'évaporation. Cet effet compensateur des aérosols explique en partie pourquoi, en dépit du réchauffement global, l'évaporation continentale n'a que peu augmenté au XXe siècle, mais il est appelé à disparaître. Car contrairement aux gaz à effet de serre, qui persistent des années, voire des décennies, dans l'atmosphère, les aérosols se déposent assez vite et sont lessivés par les précipitations. ■

Propos recueillis par Fabienne Lemarchand

[1] A. Dai *et al.*, *J. Hydrometeorology*, 5, 1117, 2012.

[2] J. Sheffield *et al.*, *Nature* 491, 435, 2012.

[3] H. Douville *et al.*, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate 1632, 2012.

Les sédiments déposés par le Nil dans cette petite dépression, près de la ville de Rashid, ont permis de comprendre l'origine de l'affaissement du delta du fleuve. © CLÉMENT FAUX

Le delta du Nil menacé par le poids de ses sédiments

GÉOLOGIE

L'affaissement du delta du Nil depuis au moins 8 000 ans est dû en grande partie au tassement des sédiments sous leur propre poids.

Le delta du Nil est le cœur de l'Égypte et son grenier. Mais comme la majorité des deltas des autres grands fleuves, il s'effondre et recule de plusieurs mètres par an. Les nombreux barrages construits en amont au cours du XX[e] siècle piègent tellement de sédiments que le delta n'est plus suffisamment alimenté par ces derniers pour se régénérer et contrecarrer les effets de l'érosion côtière. Surtout, les faibles apports sédimentaires ne parviennent plus à compenser l'élévation du niveau de la mer Méditerranée due au réchauffement du climat.

Toutefois, Nick Marriner, du Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement, à Aix-en-Provence, et ses collègues viennent de montrer que le recul du delta a en réalité commencé bien avant la construction des barrages [1]. Les géomorphologues ont étudié les sédiments qui se sont déposés au cours des huit derniers millénaires dans les lagunes et les tourbières du delta. *« Leur particularité est de s'être déposés à proximité de la surface de l'eau. Ils sont donc de bons indicateurs du niveau moyen de la mer de l'époque »*, explique Nick Marriner. Aujourd'hui, ces sédiments se trouvent jusqu'à 22 mètres sous le niveau de la mer.

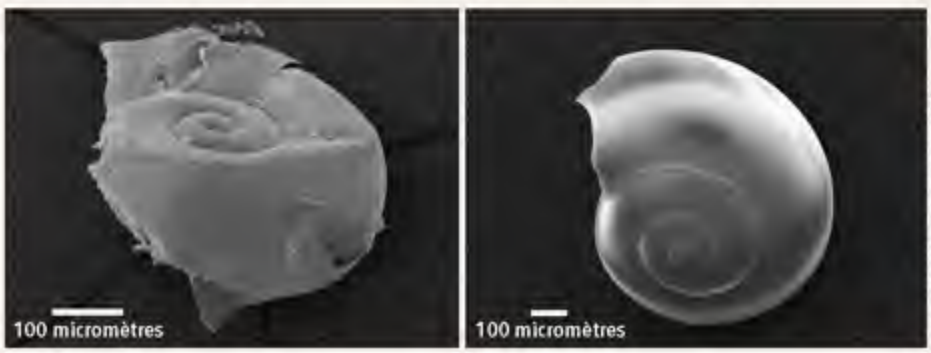
Climat plus aride. En calculant la différence entre la profondeur à laquelle ils sont actuellement et le niveau marin de l'époque, les chercheurs ont estimé l'enfoncement du delta (la subsidence) au cours du temps : entre 0,03 et 4,5 millimètres par an selon les endroits depuis 8 000 ans ; des taux comparables à ceux observés dans d'autres grands deltas.

Autre constat, cette subsidence a surtout résulté du tassement des sédiments sous leur propre poids. Le phénomène a été négligé jusqu'à présent. De 8000 à 4000 av. J.-C., les apports sédimentaires ont suffi à compenser cet affaissement par tassement. Alimenté, le delta a pu continuer sa croissance. Mais il y a 4 000 ans, l'aridification du climat au niveau du bassin-versant du Nil, couplée à un drainage de plus en plus important des zones humides par l'homme, s'est traduite par une forte baisse des apports sédimentaires dans le delta, lequel a alors commencé à se dégrader. ■ **F. L.**

[1] N. Marriner *et al.*, *Geology*, *40*, 1083, 2012

zoom Dissolutions calcaires

Cette coquille observée au microscope électronique à balayage (à gauche) – appartenant au ptéropode *Limacina helicina antarctica* – a été prélevée à 200 mètres de profondeur dans l'océan Austral. Composée d'aragonite, forme de carbonate de calcium, elle montre déjà d'importants signes de corrosion comparée à une coquille intacte (à droite), comme vient de l'observer une équipe internationale. En cause ? L'acidification des océans, consécutive à la dissolution dans l'eau de mer d'une partie du dioxyde de carbone produit par les activités humaines. L'aragonite est en effet particulièrement sensible à l'acidité de l'eau de mer. À mesure que celle-ci augmente, la concentration des ions carbonate diminue, ce qui favorise la dissolution de l'aragonite, laquelle intervient dès 200 mètres. N. Bednarsek *et al.*, *Ngeo*, doi:10.1038/ngeo1635, 2012



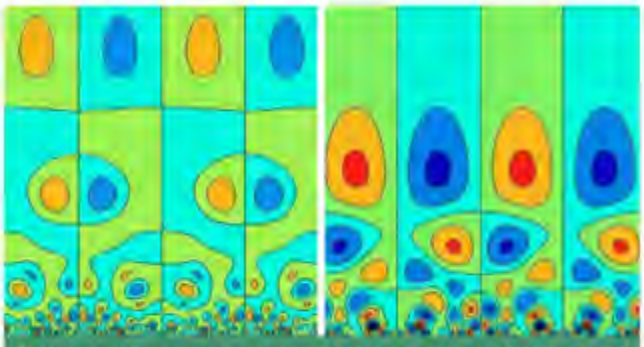
© NINA BEDNARSEK AND BERTRAND LÉZÉ

Comment vibrent les espaces abstraits issus de l'arithmétique?

Mettant à profit les nouveaux liens qui se tissent entre géométrie et arithmétique, une équipe française a démontré une conjecture datant de 1992 sur la manière dont vibrent certains espaces géométriques abstraits issus de la théorie des nombres.

© DR

Nicolas Bergeron,
professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie (Paris-VI), est spécialiste de géométrie hyperbolique et d'espaces localement symétriques. Membre junior de l'Institut universitaire de France, il mène ses recherches à l'institut de mathématiques de Jussieu.



À chaque valeur propre sur une surface hyperbolique de congruence est associée une onde. Sur ces illustrations, on a colorié les domaines limités par une courbe de niveau d'une telle onde. © FREDRIK STRÖMBERG

Vous venez de démontrer une conjecture de 1992. Que proposait-elle ?

N.B. Avec Laurent Clozel, de l'université d'Orsay, nous nous intéressons à des espaces qui ont pour origine la théorie des nombres ; ces espaces ont ainsi des propriétés de symétrie particulières. La conjecture qui nous a préoccupés stipule que ces espaces vibrent de manière spécifique : les basses fréquences sont « quantifiées » indépendamment de l'espace considéré. C'est cette conjecture que nous avons démontrée [1].

Comment définir ces espaces ?

N.B. Il s'agit d'espaces à courbure négative, comme le plan hyperbolique imaginé par Lobatschevski et Bolyai au XIX[e] siècle. Ceux que nous avons étudiés sont compacts : ils se referment sur eux-mêmes. La physique est la source d'un certain nombre d'espaces, en général leur nombre de dimension est petit, 3 le plus souvent, 4 pour l'espace-temps ou un peu plus pour les théories plus élaborées, telle la théorie des cordes. Ici nous avons considéré des espaces à courbure négative, compacts, en dimension arbitraire et dont la source est l'arithmétique. Ces espaces possèdent un « groupe » de symétries constitué de transformations arithmétiques – décrites par des tableaux de nombres entiers (des matrices). Comme la considération de relations de congruence entre ces entiers permet de varier les espaces obtenus, on les appelle « espaces hyperboliques de congruence ».

Comment ont-ils été introduits ?

N.B. En dimension 2, c'est Poincaré, en 1881, qui, le premier, considère des espaces hyperboliques de congruence. Ce sont les premiers exemples des « groupes fuchsiens » qui l'ont rendu célèbre et vers lesquels il a été conduit par l'étude de certaines équations différentielles. Les travaux de Poincaré ont ensuite été étendus aux espaces de dimension arbitraire. Depuis la fin des années 1960, des généralisations de ces espaces sont au cœur du vaste programme de Langlands, qui vise à relier la théorie des nombres aux représentations de certains groupes.

sur le web

http://tinyurl.com/pdf-article-bergeron

La page consacrée aux travaux de Nicolas Bergeron et Laurent Clozel sur le site de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions.

Chronologie

1881 : Henri Poincaré construit les premiers espaces hyperboliques de congruence en dimension 2.

1930-40 : L'Allemand Carl Siegel généralise la théorie de Poincaré à toutes les dimensions.

1954 : En dimension 2, le Norvégien Atle Selberg montre que les valeurs propres de ces espaces sont toutes dans un intervalle infini de limite inférieure positive. Il conjecture que cette limite vaut ¼.

1967-1990 : Robert Langlands propose un programme visant à relier l'arithmétique et la représentation de certains groupes ; les espaces abstraits issus de l'arithmétique (dont les espaces hyperboliques de congruence) sont l'incarnation géométrique de ce programme. James Arthur énonce des conjectures sur la classification des formes automorphes.

DES NOTES QUANTIFIÉES

En dimension 2, la conjecture de Selberg suppose que toutes les valeurs propres du laplacien sont supérieures à un quart. Quand l'espace a un nombre de dimension arbitraire, de nouvelles « notes » apparaissent. De manière imagée, si on « frappe » sur un tel espace possédant un nombre impair égal à $2m + 1$ de dimensions, les notes produites se divisent en deux parties : une partie est répartie de manière arbitraire dans un intervalle infini de limite inférieur m^2, mais il existe aussi des notes quantifiées, les basses fréquences, qui ne peuvent prendre que les valeurs $0, m^2 - (m-1)^2, m^2 - (m-2)^2, \ldots, m^2$. Au-dessus de la valeur critique m^2, les valeurs propres ne sont plus quantifiées : les mathématiciens ont montré que toute valeur propre peut être obtenue à une erreur arbitrairement petite près pour un choix convenable d'espace. C'est l'analogue du « spectre continu ».

Quelles questions vous êtes vous posées sur ces espaces ?

N.B. Dans le programme de Langlands, il existe un pan « spectral » consistant à savoir comment vibrent les espaces. En termes plus mathématiques, on cherche à obtenir la décomposition spectrale du laplacien sur ces espaces. En dimension 2, existe une conjecture de 1954 due à Atle Selberg supposant que les notes obtenues en frappant l'espace (les valeurs propres du laplacien) sont plus grandes que un quart Cette conjecture est toujours ouverte, mais elle a conduit à s'interroger sur ce qui se passe quand le nombre de dimension est supérieur à 2. La première surprise des mathématiciens fut que, dans ces espaces, il peut exister des fréquences exceptionnellement basses. La seconde surprise est que ces basses fréquences sont quantifiées

Comment avez-vous abouti ?

N.B. D'abord, il y a les travaux de James Arthur, de l'université de Toronto. Ce spécialiste des formes automorphes, sorte de fonctions qui sont invariantes par les symétries de ces espaces, avait proposé de nombreuses conjectures. Ensuite, nous avons montré que, si l'une des conjectures d'Arthur était vraie, alors la conjecture que nous voulions montrer était aussi vraie. Mais il a fallu attendre que Ngo Bao Chau, de l'université de Chicago, démontre le lemme fondamental (ce qui lui a valu la médaille Fields en 2010), pour que James Arthur démontre une version de sa conjecture. Nous nous sommes appuyés dessus pour notre preuve. ■ **Propos recueillis par Philippe Pajot**

[1] N. Bergeron et L. Clozel, *Inventiones Mathematicæ*, doi:10.1007/s00222-012-0415-2, 2012.

1992 : Cherchant à comprendre l'analogue de la conjecture de Selberg en grande dimension, Marc Burger, Jian-Shu Li et Peter Sarnak conjecturent que les valeurs propres des espaces hyperboliques de congruence sont soit contenues dans un intervalle infini, soit quantifiées.

2012 : Nicolas Bergeron et Laurent Clozel parviennent à démontrer la conjecture de Burger, Li et Sarnak.

En bref

GLUCIDES À TRÈS HAUTE ALTITUDE

Des biologistes péruviens et canadiens l'ont prouvé : les mammifères vivant à très haute altitude recourent plus au glucose comme source d'énergie que les animaux de plaine. Cette adaptation métabolique a été mise en avant en comparant, en laboratoire, des souris péruviennes vivant normalement à plus de 4000 mètres d'altitude à d'autres vivant à moins de 300 mètres. Consommer des glucides plutôt que des lipides permet de gagner 15 % d'énergie sans avoir besoin de plus d'oxygène.

M. P. Schippers *et al.*, *Curr. Biol.*, 22, 1, 2012.

DÉFENSE VÉGÉTALE BIAISÉE

Nombre de végétaux se défendent des agresseurs herbivores en libérant des substances qui attirent des prédateurs de ces herbivores. Mais une équipe néerlandaise vient de montrer que cette défense a son revers. En étudiant des choux agressés par des chenilles, elle a d'abord constaté que le chou libère une substance qui attire une guêpe parasitoïde, laquelle pique la chenille et y dépose ses œufs. Les larves qui en sortent dévorent la chenille de l'intérieur. Le bénéfice est de courte durée : une fois la chenille parasitée, sa salive est modifiée. Le chou émet alors des substances attirant une guêpe hyperparasitoïde, prédatrice de guêpe parasitoïde. Au bénéfice, cette fois, de la chenille.

E. H. Poelman *et al.*, *PloS Biol.*, 10, e1001435, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/Senat-Pesticides-Oct2012

Les conclusions d'une mission sénatoriale sur les impacts des pesticides sur la santé.

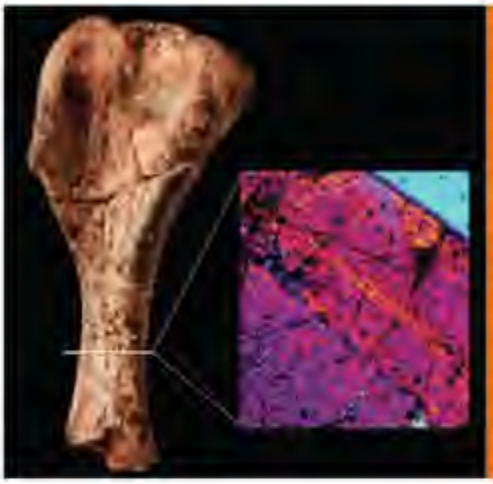
PALÉONTOLOGIE

Le plus proche parent

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Ronan Allain est paléontologue et spécialiste des dinosaures au Muséum national d'histoire naturelle de Paris.



Cet os d'environ 13 centimètres de long constitue une partie de l'humérus droit de *Nyasasaurus parringtoni*. L'observation d'une fine section au microscope optique à lumière polarisée suggère une croissance rapide. [illegible]

Sortis des collections du Musée d'histoire naturelle de Londres, où ils dormaient depuis quatre-vingts ans, des os fossilisés ont été récemment analysés. Pourraient-ils être ceux du plus ancien dinosaure connu ?

R.A. C'est effectivement l'une des hypothèses proposées par l'équipe de paléontologues qui a réalisé cette analyse [1]. Ces ossements consistent en un humérus et six vertèbres, découverts au début des années 1930 par une équipe britannique dans le sud de la Tanzanie. D'après la taille des vertèbres, l'animal, baptisé *Nyasasaurus parringtoni*, devait mesurer 2 à 3 mètres de long (longue queue comprise) et se tenait debout sur ses pattes arrière. L'observation anatomique de l'humérus révèle la présence d'une excroissance sur la partie antérieure de l'os appelée crête deltopectorale. Par

Des arbres à la limite de leur résistance

PHYSIOLOGIE

Partout dans le monde, la plupart des arbres vivent à la limite de leur seuil de résistance à l'embolie gazeuse.

Quelle que soit l'espèce concernée, et la région du globe où ils vivent, les arbres disposent que d'une marge de sécurité très faible face à la sécheresse : c'est ce que suggère une étude coordonnée par Brendan Choat, de l'université de Sydney ouest, en Australie, et Steven Jansen, de l'université d'Ulm, en Allemagne [1].

Différents travaux avaient déjà montré que, dans leur milieu naturel, certains arbres peuvent transpirer avec une intensité telle que leur vie est en danger. Le mécanisme incriminé est connu. Pour réaliser la photosynthèse, les arbres exsudent de grandes quantités d'eau par les pores – ou stomates – de leurs feuilles. Cette transpiration crée un effet de succion grâce auquel l'eau absorbée par les racines monte vers le sommet de l'arbre, par les vaisseaux du bois. Plus il fait chaud, plus l'arbre transpire, et plus l'effet de succion exercée sur la sève se renforce.

Au-delà d'un certain seuil, cependant, il y a risque d'embolie : des bulles d'air apparaissent dans les vaisseaux, ce qui bloque la circulation de la sève. Si ces bulles sont trop nombreuses, l'arbre se dessèche, puis meurt. Ce seuil est une donnée propre à chaque espèce, mesurable au laboratoire.

Succion maximale. À quel point offre-t-il une marge de sécurité suffisante pour faire face aux épisodes de sécheresse ? Pour le savoir, l'équipe conduite par Brendan Choat et Steven Jansen a créé une base de données regroupant toutes les informations disponibles – publiées ou non – relatives à la vulnérabilité des arbres à l'embolie. Elle y a recensé, d'une part, la valeur de succion maximale atteinte à l'heure actuelle en milieu naturel. Et d'autre part, la valeur seuil au-delà de laquelle se déclenche l'embolie en laboratoire. Puis elle a comparé ces deux

des dinosaures

ailleurs, l'analyse du tissu osseux révèle une croissance rapide. Or, on retrouve ces deux caractéristiques chez les dinosaures primitifs, d'où l'hypothèse que ces os proviennent soit d'un tel dinosaure primitif, soit d'un proche parent. Si c'est un dinosaure, alors c'est le plus ancien connu. Car *Nyasasaurus* vivait au Trias moyen, il y a 243 millions d'années. Soit 10 à 15 millions d'années avant les plus anciens dinosaures connus jusqu'ici comme l'herbivore *Eoraptor* et le petit carnivore *Eodromaeus*.

Peut-on affirmer qu'il s'agit d'un dinosaure ou d'un proche parent ?

R.A. Il est difficile de classer *Nyasasaurus* dans le groupe des dinosaures en ne disposant que d'un humérus et de quelques vertèbres. En effet, les archosaures, famille de reptiliens ayant précédé les dinosaures, partagent avec ceux-ci quelques caractéristiques – par exemple, une croissance osseuse rapide. Pour être certain de l'appartenance de *Nyasasaurus*, il faudrait disposer de l'os de la cheville, l'astragale, qui a une forme bien particulière chez les dinosaures ou, mieux encore, du bassin. En effet, chez les dinosaures, la cavité osseuse de la hanche, dans laquelle vient se loger la tête du fémur, est perforée, ce qui est une caractéristique des espèces se dressant sur leurs deux pattes. Ce n'est pas le cas chez les premiers archosaures.

Les dinosaures ont-ils pu apparaître plus tôt qu'on ne le pensait ?

R.A. Oui, il est envisageable qu'ils soient apparus 15 millions d'années plus tôt. Mais il sera difficile d'en avoir la certitude, car nous disposons de peu de fossiles datant de cette période. À cette époque, la faune était en train de se reconstituer, après l'extinction de la transition Permien-Trias, qui a vu la disparition de 95 % des espèces marines et de 70 % des espèces terrestres, il y a 252 millions d'années. C'est alors que sont apparus les archosaures dont descendent les crocodiliens et les dinosaures, et certaines lignées voisines de celle des dinosaures. Jusqu'à présent, la plus proche était représentée par *Asilisaurus kongwe*, quadrupède herbivore qui vivait il y a environ 245 millions d'années. *Nyasasaurus parringtoni* définit peut-être une lignée encore plus proche. ■

Propos recueillis par Olivier Donnars

[1] S. J. Nesbitt *et al.*, *Biol. Lett.*, 9, 1, 2013.

au dessèchement

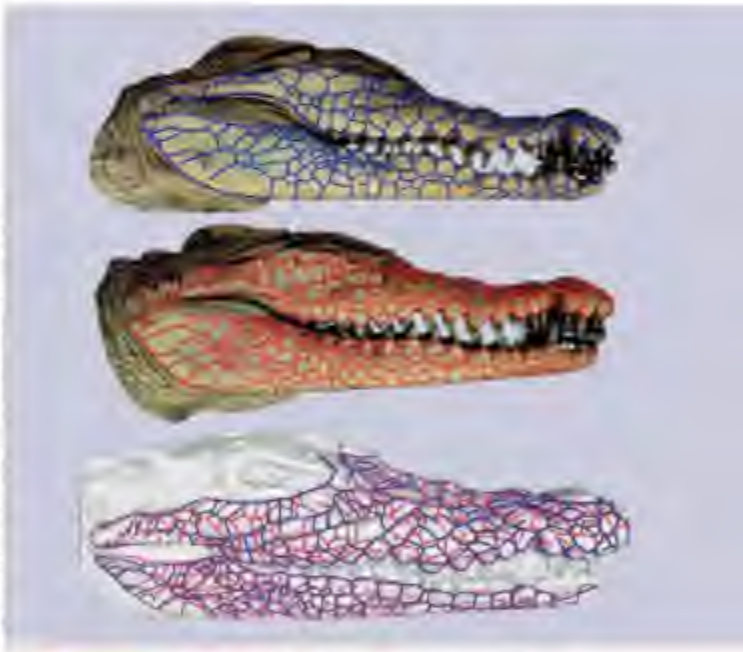
valeurs pour 226 espèces réparties sur 81 sites dans le monde. La différence entre les deux représente la marge de sécurité de l'arbre face au risque d'embolie. Elle a alors découvert que 70 % des espèces testées, majoritairement des feuillus, ont aujourd'hui une marge de sécurité très faible, et cela, quel que soit le type d'écosystème où ils vivent : aride, tempéré ou tropical.

Les scénarios climatiques prévoyant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse, faut-il craindre une recrudescence d'épisodes de mortalité dus à des embolies massives ? « *Les arbres disposent de plusieurs moyens d'éviter l'embolie,* commente Erwin Dreyer, spécialiste d'écophysiologie des arbres forestiers à l'INRA de Nancy. *Entre autres, fermer leurs stomates afin de limiter la transpiration, ou augmenter leur capacité d'enracinement pour prélever plus d'eau dans le sol. Mais si les sécheresses accidentelles se multiplient à l'avenir, alors ces mécanismes pourraient ne pas suffire.* »

Dans l'immédiat, les résultats obtenus vont pouvoir être inclus dans des modèles visant à mieux prévoir la mortalité de telle ou telle espèce, et l'expansion ou le dépérissement de telle ou telle forêt. Ils permettront aussi d'identifier les espèces les plus susceptibles de résister et les plus fragiles. ■

Caroline Depecker

[1] B. Choat *et al.*, *Nature*, 491, 752, 2012.



© IVANA MARUKYAN & MICHEL C. MILINKOVITCH/UNIVERSITY OF GENEVA

zoom Peau craquante

Les écailles de la tête des crocodiles ont une forme et une taille très variables d'un animal à l'autre (ci-dessus), contrairement aux écailles du reste du corps. En combinant des techniques de biologie du développement à de la modélisation, une équipe suisse vient de découvrir la raison de cette variabilité : ces écailles faciales sont formées par craquage de la peau au cours du développement embryonnaire. Ce craquage résulte probablement de la tension exercée, sous la peau, par la croissance très rapide du squelette de la mâchoire. Il s'agit donc d'un processus très différent de celui, placé sous contrôle génétique, qui régit normalement le développement des écailles, des plumes ou des poils chez les vertébrés.

M. C. Milinkovitch *et al.*, *Science*, doi: 10.1126/science.1226765, 2012.

En bref

FROMAGE PRÉHISTORIQUE

La plus ancienne preuve de production de fromages en Europe date d'il y a 7 500 ans. Des chercheurs britanniques et polonais l'ont mise en évidence par l'analyse chimique de résidus, trouvés sur les bords des trous d'une passoire en céramique découverte dans le centre de la Pologne. Les archéologues soupçonnaient depuis longtemps cet ustensile, qu'ils retrouvent assez fréquemment dans les fouilles de cette époque, de servir à la fabrication de fromages. Elle se faisait probablement à la manière des faisselles modernes, en séparant le lait caillé du petit-lait.

M. Salque *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature11698, 2012.

LES CAUSES DE LA MORT DE TYCHO BRAHE

L'astronome Tycho Brahe n'est pas mort d'empoisonnement au mercure en 1601, comme le pensaient certains chercheurs depuis la détection de ce métal dans des poils de sa barbe. Par l'étude d'échantillons de cheveux, d'os et de vêtements prélevés lors de l'ouverture de sa tombe en 2010, une équipe internationale a en effet montré que le mercure venait vraisemblablement d'un produit d'embaumement. Sa teneur était en outre insuffisante pour avoir causé l'urémie dont il est mort.

K. L. Rasmussen *et al.*, *Archaeometry*, doi:10.1111/j.1475-4754.2012.00729.x, 2012.

sur le web

tinyurl.com/seine-nord

Les découvertes archéologiques réalisées à l'occasion de la construction du canal Seine-Nord-Europe sont présentées sur ce site de l'Institut national de recherches archéologiques préventives.

La plus ancienne image d'un

ÉGYPTOLOGIE

Les plus vieilles représentations d'un pharaon viennent d'être mises au jour. Il s'agit de gravures rupestres découvertes en Égypte du Sud et datées d'environ 3200 av. J.-C.

La civilisation de l'ancienne Égypte doit sans doute beaucoup de sa longévité à l'institution pharaonique. Mais ses débuts sont très mal connus, faute de textes. C'est pourquoi la découverte par des égyptologues belges et américains des plus anciennes représentations d'un pharaon, des gravures rupestres, est capitale pour éclairer la naissance de l'État égyptien. Elle remonterait à environ 3200 av. J.-C.

Le site se trouve au sud du pays, près de la ville d'Assouan. Un archéologue britannique avait signalé la présence de gravures à cet endroit à la fin du XIX[e] siècle, sans en donner la localisation. La redécouverte du site en 2009 a montré que les gravures rupestres se répartissent en fait sur sept sites à quelques dizaines de mètres les uns des autres. Il y a en tout une dizaine de panneaux différents, sur lesquels figurent des bateaux, des archers, de probables prisonniers, des taureaux et divers animaux.

Cette photo, prise près d'Assouan, illustre une scène royale gravée dans la roche. À droite, un personnage plus grand que les autres (29,8 centimètres), porte une coiffe, un bâton et est accompagné d'un chien. Ces attributs indiquent qu'il s'agit d'un pharaon.

Présence pharaonique. Sur trois panneaux apparaît le personnage interprété par les chercheurs comme un pharaon. Il est en effet muni d'attributs qui vont caractériser la fonction royale par la suite dans la civilisation égyptienne : plus grand que les autres personnages, parfois suivi ou précédé de porteurs, il tient un bâton évoquant un sceptre. Surtout, il porte un couvre-chef allongé, de forme identique à la couronne blanche qui coiffe les pharaons. Enfin, le caractère divin du souverain égyptien semble déjà présent. Sur l'un des panneaux, il est représenté avec un dieu canidé dans une barque sacrée.

Comme pour la plupart des gravures rupestres, il n'est pas possible de dater précisément celles du site. Cependant, les images que produisaient les anciens Égyptiens étaient très codifiées, évoluant assez peu. C'est pourquoi de petits changements survenus dans leur manière de représenter les choses permettent de dater à peu près les images. C'est ce qu'ont fait les chercheurs, spécialistes reconnus de l'iconographie égyptienne. La taille du roi par rapport à ses sujets, l'orientation de sa coiffe, ou encore la présence d'un chien à ses côtés leur ont ainsi permis de situer les gravures avant les plus anciennes images de pharaon découvertes jusqu'à présent.

© COURTESY EPIGRAPHIC SURVEY, ORIENTAL INSTITUTE, UNIVERSITY OF CHICAGO

zoom Le labyrinthe des Nazcas

Cette allée est l'une des lignes d'un dessin nazca, immenses figures visibles seulement depuis le ciel réalisées entre 700 et 300 ans av. J.-C. Elle pourrait fournir l'une des clés de leur origine. Le dessin dont elle fait partie, découvert dans le sud du Pérou par deux chercheurs américains, semble en effet destiné à être parcouru à pied. Car il a la forme d'un labyrinthe, qui débute par une petite spirale circulaire et s'achève par l'allée qui va s'élargissant pour aboutir à un monticule. Les deux chercheurs suggèrent donc que des processions rituelles ont pu se dérouler sur ce trajet d'un peu plus de 4 kilomètres. C. Ruggles et N. Saunders, *Antiquity*, 86, 334, 1126, 2012.

© CLIVE RUGGLES (WWW.CLIVERUGGLES.COM)

pharaon

Celles-ci avaient été trouvées à une centaine de kilomètres au nord, à Hiérakonpolis, alors capitale de la Haute-Égypte.

Ces représentations se placent juste avant ce que les égyptologues considèrent comme le point de départ de la royauté égyptienne, l'unification du sud et du nord du pays, la Haute- et la Basse-Égypte, vers 3100 av. J.-C. *« Avant cette date, nous connaissions des images où apparaissait un personnage de statut spécial, sans doute un roi. Mais un pharaon dès cette époque, c'est inattendu »*, explique Gwenola Graff, de l'Institut de recherche pour le développement, à Paris.

Les gravures font sans doute partie d'un même ensemble, car leurs styles sont identiques. Certains indices suggèrent que les graveurs appartenaient à l'administration royale. Enfin, quatre hiéroglyphes ont été gravés sur le plus grand des panneaux. Ils semblent relier toutes les gravures à une sorte d'inventaire fiscal du royaume, connu plus tard sous le nom de procession d'Horus. Ce qui expliquerait sa présence loin de la capitale : le site se trouvait près de la frontière avec la Nubie. ■ **Nicolas Constans**

[1] S. Hendrickx *et al.*, *Antiquity, 86*, 1068, 2012.

ANTIQUITÉ *Le premier port de Rome vient d'être localisé*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Jean-Philippe Goiran est chercheur au laboratoire Archéorient, CNRS et université Lyon-II.

Un forage délicat vous a permis de découvrir le premier port de Rome. Où se trouve-t-il ?

J.-P.G. Dans le nord-ouest de la cité antique d'Ostie, à l'embouchure du fleuve de Rome, le Tibre, à une vingtaine de kilomètres du centre de la capitale. C'est ce que révèle l'analyse de deux carottes de sédiments prélevées dans cette zone [1]. Les textes de l'époque citent le port d'Ostie sans donner sa localisation. Les fouilles archéologiques de la ville, aux XIX[e] et XX[e] siècles, n'ont pas permis de le découvrir, mais une zone où le port de Rome était susceptible de se trouver, a été circonscrite. Puis au début des années 2000, des chercheurs allemands ont cartographié cette zone, à l'aide de photos aériennes et d'instruments sondant le sous-sol. Comme elle semblait vide de bâtiments, ils l'ont interprétée comme le bassin du port, mais d'autres archéologues estimaient qu'il pouvait s'agir d'une place. Il était difficile de le vérifier, car dans cette zone proche du fleuve et de la mer, la nappe phréatique limite en profondeur les fouilles archéologiques. C'est pourquoi nous avons utilisé un dispositif spécial pour extraire la carotte sans qu'elle s'effondre, nous permettant d'atteindre 13 mètres de profondeur.

Comment concluez-vous qu'il s'agit bien d'un port ?

J.-P.G. L'étude des carottes montre que la zone passe d'un milieu caractéristique d'une embouchure de fleuve à un autre plus calme, où de la vase noirâtre se dépose, ce qui est typique d'un bassin portuaire. De plus, la transition entre ces deux milieux est abrupte, suggérant une origine artificielle. Enfin, cette nouvelle phase apparaît entre le IV[e] et le II[e] siècle av. J.-C., soit à peu près en même temps que la fondation d'Ostie, vers le IV[e] siècle av. J.-C. L'étude de la carotte établit qu'ensuite la zone paraît s'ensabler inexorablement, sans doute à cause de crues successives du Tibre. Elle devient inaccessible pour la plupart des bateaux dès le I[er] siècle av. J.-C., ce que mentionne le géographe grec Strabon.

Quelles autres informations vous apporte cette étude ?

J.-P.G. D'abord, nous pensions qu'Ostie était un port essentiellement fluvial, n'accueillant que des bateaux à faible tirant d'eau comme des barges. L'analyse de la carotte nous apprend, au contraire, que sa profondeur était importante, atteignant 6 mètres. Les navires n'avaient donc pas besoin de mouiller au large, mais pouvaient entrer dans le port et y débarquer leurs cargaisons. L'autre surprise est qu'il se soit écoulé plus d'une génération entre l'ensablement du port et la construction de son remplaçant, Portus, en 42 apr. J.-C. Comment Rome a-t-elle assuré ses approvisionnements pendant ce laps de temps ? Le trafic maritime s'est-il reporté sur l'important port de Pouzzoles, près de Naples ? Ou un port temporaire, aujourd'hui oublié, a-t-il pris le relais ? Ces questions restent ouvertes. ■

Propos recueillis par N.C.

[1] J.-P. Goiran *et al.*, *MEFRA, 123*, 2, 2012.

En bref

SCLÉROSE EN PLAQUES

Une équipe américaine a découvert comment les neurones sont endommagés au stade précoce de la sclérose en plaques. Les neurologues ont observé *in vivo* le cerveau de souris atteintes de la maladie au microscope à haute résolution. Ils y ont détecté une anomalie : des cellules immunitaires du système nerveux, les microglies, s'agglutinaient autour de vaisseaux sanguins. Elles se seraient regroupées sous l'action d'une protéine de coagulation sanguine échappée des vaisseaux. Or cette activation dégage des dérivés de l'oxygène toxiques pour les neurones. Quelques jours après cette observation, les chercheurs ont repéré des neurones lésés dans la zone d'accumulation des microglies.

D. Davalos *et al.*, *Nat. Commun.*, 3, 1227, 2012.

RÉSISTANCE À LA COCAÏNE

Les ratons mâles dont le père a consommé de la cocaïne seraient résistants aux effets addictifs de cette drogue, selon une étude américaine. En effet, lorsqu'on présente à ces ratons de la cocaïne pendant plusieurs jours, ils en consomment moins souvent et dans des quantités plus faibles que les ratons contrôles. D'après les auteurs, la consommation de cocaïne par les pères entraînerait des modifications dites « épigénétiques » dans leur sperme, ce qui provoquerait des changements dans l'expression des gènes transmis à leur descendance.

F. V. Fassolet *et al.*, *Nat. Neurosci.*, doi:10.1038/nn.3280, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/info-troubles-neurologiques

L'institut et l'hôpital neurologiques de Montréal informe sur les maladies neurologiques, leur diagnostic et leurs traitements.

PSYCHOLOGIE

Regarder le visage d'autrui ne permet pas de reconnaître ses émotions

QUESTIONS À L'EXPERT

François Ric est professeur de psychologie sociale à l'université de Bordeaux-Segalen.

Des chercheurs ont voulu savoir ce qui, du corps ou du visage, nous permet de percevoir l'état affectif d'une personne. Et leur conclusion est contre-intuitive. Qu'ont-ils découvert ?

F.R. Que nous sommes victimes d'une illusion ! Nous pensons percevoir les émotions d'autrui à travers son expression faciale. Or cela ne correspond pas à la réalité. L'étude dirigée par Alexander Todorov, de l'université de Princeton, montre que nous avons besoin d'observer le corps – et non le visage –, pour savoir si l'émotion que quelqu'un ressent est positive ou négative [1]. Ce résultat est très étonnant. Il est en contradiction avec la plupart des théories sur la perception des émotions, d'après lesquelles l'expression faciale permet de déterminer au moins ce que l'on appelle la « valence » d'une émotion, c'est-à-dire son caractère positif ou négatif. Toutefois, cette étude porte exclusivement sur les émotions intenses, comme celles ressenties par quelqu'un qui vient de gagner au Loto.

© ASAP CREATIVE/REUTERS

L'observation d'images de visages isolés (B) n'a pas permis à des volontaires de définir la nature de l'émotion ressentie par les joueurs de tennis. Ils ont pu le faire en regardant les photographies du corps des sportifs (A).

Comment les chercheurs sont-ils parvenus à ce résultat ?

F.R. Ils ont présenté à des volontaires des photos de joueurs de tennis exprimant des émotions intenses lors d'une victoire ou d'une défaite, et ils leur ont demandé de dire si cette émotion était positive ou négative. Parmi les photos, certaines montraient uniquement le visage, d'autres uniquement le corps, et enfin d'autres montraient le corps et le visage. Or les volontaires ont beaucoup plus souvent donné la bonne réponse lorsque le corps du joueur apparaissait, avec ou sans le visage. En revanche, quand la photo ne montrait que le visage, le pourcentage de bonnes réponses n'était pas significatif.

Les volontaires étaient-ils conscients de s'appuyer principalement sur la posture corporelle du joueur pour évaluer son état affectif ?

F.R. Non, pas tous. Dans le cas où la photo montrait le corps et le visage, seuls 47 % des sujets ont déclaré avoir donné leur réponse d'après la posture du corps, tandis que 53 % ont indiqué s'être appuyés sur l'expression faciale, alors que celle-ci n'a pas d'influence sur l'exactitude du jugement. Les psychologues ont également posé la question à des volontaires n'ayant pas passé le test. Parmi eux, 80 % ont dit avoir déterminé l'état affectif du joueur en regardant son visage, 20 % son corps et son visage, et aucun son corps seul.

Comment expliquer cette illusion ?

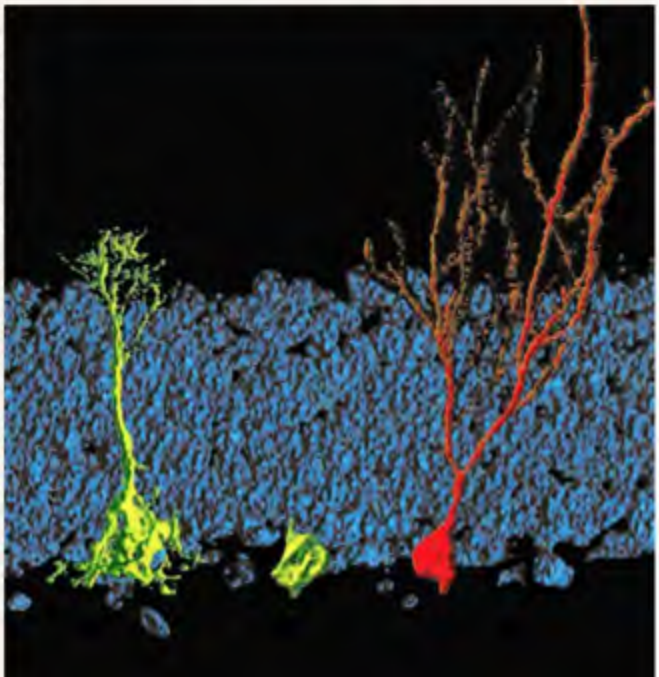
F.R. Il s'agit sans doute d'un a priori culturel. Depuis Darwin, les théories évolutionnistes des émotions considèrent que l'expression faciale est une composante essentielle de l'émotion. À chaque émotion (joie, colère, tristesse...) correspondrait une expression faciale : une correspondance universelle et biologiquement précâblée. Cette théorie a été confortée par de nombreuses expériences. Mais dans ces dernières, les photos montrées aux volontaires étaient celles de personnes qui posaient : la plupart du temps elles n'exprimaient pas une émotion dans une situation réelle, et quand elles le faisaient, cela ne correspondait pas au pic d'intensité de l'émotion. Cela explique en partie le fait que l'on n'ait pas détecté plus tôt le rôle des postures corporelles dans la perception des émotions intenses. Reste maintenant à savoir si les postures sont également importantes dans la perception d'émotions plus modérées. ■

Propos recueillis par Jacques Abadie

[1] H. Aviezer *et al.*, *Science*, *338*, 1225, 2012.

zoom Lipides et nouveaux neurones

Un mécanisme clé dans la formation de nouveaux neurones à l'âge adulte a été découvert par une équipe internationale : il implique une enzyme appelée Fasn, qui participe à la synthèse de lipides par les cellules souches cérébrales dans les deux zones principales de neurogenèse. Pour mettre en évidence son rôle, les biologistes ont bloqué la production de Fasn dans le cerveau de souris au moyen d'une substance chimique. Résultat : les cellules souches cérébrales sont restées dormantes (à gauche), alors que chez un animal sain elles se divisent (au milieu) pour donner de nouveaux neurones (à droite). L'enzyme Fasn serait également indispensable pour maintenir l'activité des cellules souches cérébrales sur le long terme. M. Knobloch *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature11689, 2012.



© SIMON BRAUN/BRAIN RESEARCH INSTITUTE, UNIVERSITY OF ZURICH, SWITZERLAND

En bref

VIE PLUS LONGUE

L'espérance de vie dans le monde a augmenté en moyenne de 11 ans entre 1970 et 2010, selon une étude britannique compilant les données de 187 pays. Les hommes ont gagné 11 ans, les femmes 12 ans : en 1970, l'espérance de vie d'un homme était de 56 ans, celle d'une femme de 61 ans, contre respectivement 67 ans et 73 ans en 2010. Derrière ces chiffres se cachent de grandes disparités selon les pays. Ainsi, en 2010, l'espérance de vie des femmes était de 85,9 ans au Japon, contre 43,6 ans en Haïti. L'étude montre aussi que, malgré l'augmentation globale de l'espérance de vie, elle a diminué dans certaines régions du monde, comme le sud de l'Afrique subsaharienne, avec une baisse de 1,3 an entre 1970 et 2010 (0,9 pour les femmes), sans doute en raison de l'épidémie de sida.

H. Wang *et al.*, *The Lancet*, 9859, 2071, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/rapport-handicap

Dernier rapport de l'Organisation mondiale de la santé sur le handicap dans le monde.

FERTILITÉ *La qualité du sperme des Français est-elle en baisse ?*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Bernard Jégou dirige l'institut de recherche en santé, environnement et travail, à Rennes.

La concentration de spermatozoïdes dans le sperme des Français a baissé de 32 % entre 1989 et 2005. Comment les chercheurs sont-ils parvenus à ces conclusions ?

B.J. Ils ont utilisé les données sur les tentatives de fécondation *in vitro* recueillies entre 1989 et 2005 par l'association Fivnat. [1] Ils n'ont retenu que les données sur les hommes dont la partenaire avait les trompes de Fallope bouchées, soit plus de 26 000 hommes. Les chercheurs sont partis du principe que, dans ces couples, l'infertilité provenait de la femme et non de l'homme, et que le groupe d'hommes considéré était représentatif de la population générale.

Est-ce la première observation d'une baisse de la qualité du sperme ?

B.J. Le débat sur la baisse de la concentration en spermatozoïdes est intense depuis vingt ans. Il a été déclenché par une étude publiée en 1992, qui indiquait une baisse de la qualité du sperme dans le monde occidental industrialisé. En France, divers résultats ont été obtenus selon les villes : la concentration spermatique de donneurs de sperme a baissé à Paris entre 1970 et 1990, mais elle est restée stable à Rennes et à Toulouse. Une étude récente à Tours signale une baisse des valeurs spermatiques des donneurs. Il existe donc des variations régionales inexpliquées.

Cette nouvelle étude clôt-elle le débat ?

B.J. Certainement pas, et ce malgré l'utilisation de méthodes statistiques rigoureuses. D'une part, les données provenant de toute la France ne prennent pas en compte les variations régionales. D'autre part, on ne peut écarter l'éventualité qu'une partie des hommes retenus aient été infertiles. Pour s'assurer que l'infertilité du couple ne provenait que de la femme, il faudrait savoir si le couple était parvenu à avoir un enfant par fécondation *in vitro*, or cette information n'est pas disponible. Enfin, le statut socioculturel des hommes concernés n'est pas connu. Or l'évolution de la consommation de tabac et/ou de l'alcool, par exemple, peut avoir un impact sur la qualité du sperme.

Les auteurs lient la baisse et les perturbateurs endocriniens. Qu'en pensez-vous ?

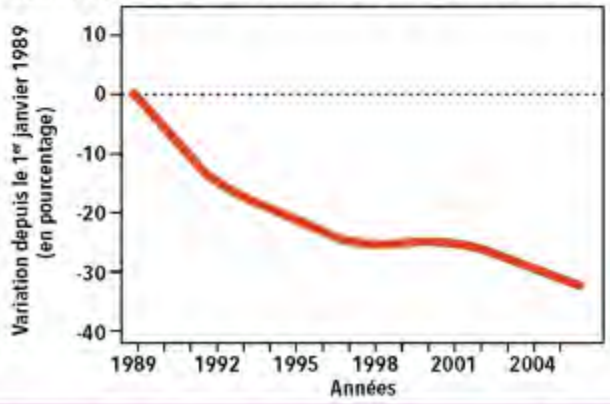
B.J. À ce jour, aucun lien n'est établi. De nombreux facteurs influent sur l'organisme : produits chimiques, facteurs physiques (surtout les rayonnements lors d'examens radiologiques), facteurs infectieux, stress, alcool, tabac, etc. Ces éléments peuvent interagir, cela rend les choses complexes.

Comment obtenir des résultats plus fiables à l'avenir ?

B.J. Il faudrait s'inspirer des études menées dans les pays scandinaves, où un suivi de la population masculine est effectué dans une même ville pendant plusieurs années. Ainsi, à Copenhague, au Danemark, on demande chaque année à des conscrits de donner leur sperme, ce qui a mis en évidence une augmentation de sa qualité de 4 % sur dix ans. À l'inverse, à Turku, en Finlande, une baisse est observée. Ces études prospectives suivent des méthodologies standardisées. Leur caractère d'observatoire des populations permettra de progresser. ■ **Propos recueillis par Jacques Abadie**

[1] M. Rolland *et al.*, *Hum. Reprod.*, doi:10.1093/humrep/des415, 2012.

ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN SPERMATOZOÏDES

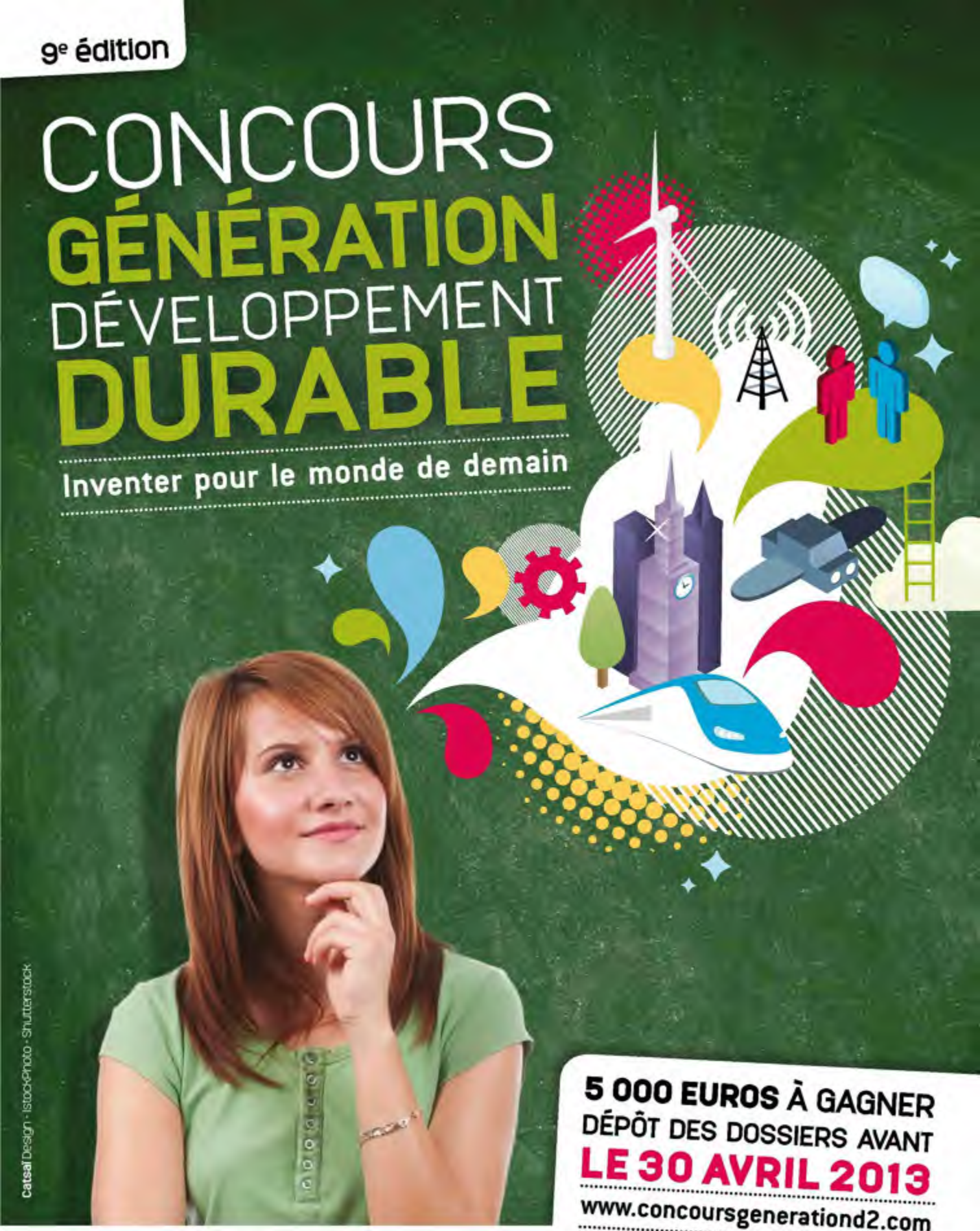


Les Français montrent une diminution régulière de la concentration en spermatozoïdes de leur sperme depuis 1989. Une mesure réalisée sur plus de 26 000 hommes de 35 ans. SOURCE : HTTP://HUMREP.OXFORDJOURNALS.ORG

9e édition

CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

Inventer pour le monde de demain



5 000 EUROS À GAGNER

DÉPÔT DES DOSSIERS AVANT

LE 30 AVRIL 2013

www.concoursgenerationd2.com

Catsaï Design - istockphoto - Shutterstock

Un événement

La Recherche
L'actualité des sciences

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

Avec le soutien de

ANOUS

letudiant.fr

terraeco

En bref

L'EBOLA TRANSMIS PAR DES PORCS

L'Organisation mondiale de la santé vient de placer le porc comme possible source d'infection par le virus Ebola pour l'homme. À l'origine de cette décision, l'étude d'une équipe de virologues de Winnipeg, au Canada. Celle-ci a inoculé à six porcs la souche la plus virulente du virus Ebola, nommée « Zaïre ». Puis ils ont transféré quatre macaques dans la porcherie, dans des cages séparées, empêchant tout contact physique. Résultat : tous les macaques ont été infectés, suggérant une contamination par voie respiratoire, sans contact direct.

tinyurl.com/9wmvhmo

PRÉDIRE L'OBÉSITÉ

Corpulence des parents, tabagisme pendant la grossesse, poids du bébé à la naissance… On le sait, plusieurs facteurs augmentent le risque qu'un bébé à naître devienne obèse une fois enfant. Mais comment se combinent-ils entre eux ? Une équipe internationale est parvenue à les mettre en équation. Testée sur plusieurs milliers d'enfants finlandais suivis de la naissance à l'adolescence, cette équation a permis de retrouver 80 % des enfants obèses. Disponibles sous forme d'un formulaire informatique facile à remplir, ces informations sont utilisables par les professionnels de santé pour mieux cibler les familles à risque.

A. Morandi *et al.*, *Plos One*, 7, e49919, 2012.

sur le web

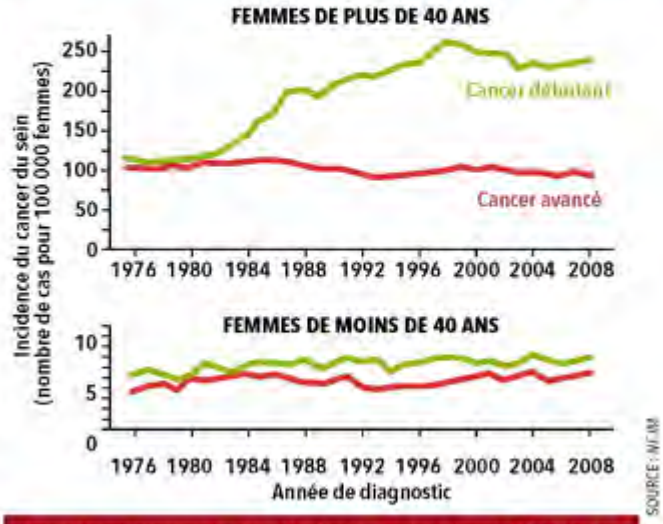
www.mpedia.fr

Dédié à la santé des enfants de 0 à 6 ans, ce site est destiné à guider et à conseiller les parents. Conçu par des pédiatres de l'Association française de pédiatrie ambulatoire, il est financé par de l'argent public.

Une femme sur trois traitée inu

CANCER DU SEIN

Sur les trente dernières années, le dépistage du cancer du sein aurait engendré près de 30 % de surdiagnostic aux États-Unis.



SOURCE : N. Engl. J. Med.

Le nombre de cancers du sein débutants a explosé depuis 1976 chez les Américaines de plus de 40 ans soumises au dépistage, en partie à cause des surdiagnostics. Les femmes plus jeunes, non dépistées, montrent au contraire un taux stable de cancers débutants sur la même période.

C'est un des points noirs du dépistage du cancer du sein : un certain nombre de femmes sont victimes d'un surdiagnostic. Mammographie et prélèvement révèlent la présence d'une petite tumeur, immédiatement traitée. Or elle n'aurait jamais provoqué le moindre symptôme. Ces femmes sont donc traitées pour rien. Combien sont concernées ? Les chiffres varient suivant le dépistage pratiqué. « *Aux États-Unis, selon nos calculs, 1,3 million de femmes auraient été surdiagnostiquées sur ces trente dernières années*, déclare Archie Bleyer, de l'université de l'Oregon, qui vient de publier une étude à ce sujet avec Gilbert Welch, de l'université de Dartmouth [1]. *Rien qu'en 2008, ce surdiagnostic aurait concerné 70 000 cas, soit 31 % des femmes dépistées.* »

Dans ce pays, le dépistage est proposé depuis les années 1980 aux femmes dès 40 ans. L'analyse d'Archie Bleyer et de Gilbert Welch a été effectuée à partir de données recueillies entre 1976 et 2008 sur un échantillon représentant 10 % des Américaines de 40 ans ou plus. Le chiffre obtenu est important. Bien plus qu'en France, où le taux de surdiagnostic est évalué entre 10 % et 20 %. Il faut préciser qu'aux États-Unis le dépistage est proposé une fois par an à toutes les femmes dès 40 ans, sans limite d'âge, tandis qu'en France il concerne celles de 50 à 74 ans, une fois tous les deux ans.

Réduire les surdiagnostics. À elle seule, la fréquence du dépistage outre-Atlantique augmente mécaniquement le risque de surdiagnostic. En outre, selon Jérôme Viguier, de l'Institut national du cancer : « *Cette étude américaine présente des limites méthodologiques, celles qui font consensus placent plutôt le surdiagnostic entre 10 % et 20 %.* »

Toutefois, au-delà de la bataille de chiffres, un point ne fait pas débat : le surdiagnostic est inhérent à tout dépistage. Dès lors, comment réduire sa proportion, et surtout le surtraitement qui en découle ? « *Pour y parvenir, nous recherchons des marqueurs biologi-*

zoom Piste vaccinale

L'injection intradermique peut-elle rendre plus efficaces certains vaccins en cours de développement ? Pour explorer cette hypothèse, une équipe franco-néerlandaise a injecté un vaccin expérimental contre le virus du sida (VIH) dans la peau de souris. Elle a alors découvert un phénomène inattendu : des cellules immunitaires inflammatoires (en rose) s'infiltrent dans le derme, recueillent les antigènes du VIH contenu dans le vaccin (en vert)… puis les transportent vers la moelle osseuse. Cela provoque alors la maturation et la multiplication de globules blancs capables de garder ces antigènes en mémoire. Ils pourront ainsi détruire les cellules infectées par le virus si celui-ci pénètre un jour dans l'organisme. D. Duffy *et al.*, *Immunity*, 37, 1, 2012.

tilement aux États-Unis

ques capables de prédire si la tumeur détectée va régresser, rester stable ou progresser en un cancer invasif, explique Suzette Delaloge, spécialiste du cancer du sein à l'institut Gustave-Roussy. *Mais ce travail nécessitera de longues années de recherche.* »

Ainsi, si la tumeur présente un faible risque de se muer en cancer agressif, on pourrait imaginer une simple surveillance ou des traitements plus légers : retrait de la tumeur sans ablation totale du sein, curage ganglionnaire partiel, radiothérapie et chimiothérapie plus légères, etc. *« Encore faudra-t-il s'assurer que ces stratégies ne réduisent pas les chances de survie, ni la qualité de vie sur le long terme »*, prévient Jérôme Viguier.

Autre piste explorée : découvrir des marqueurs génétiques qui permettent de déceler un risque accru chez une femme de développer un cancer du sein. *« Dans le futur, on pourra peut-être ainsi restreindre le dépistage à des femmes présentant un risque un peu plus élevé »*, explique Suzette Delaloge. En attendant ces avancées, certains médecins prennent déjà les devants. *« À l'hôpital Saint-Louis, nous avons pris le parti de ne pas prescrire de radiothérapie aux femmes présentant certaines tumeurs très localisées de moins d'un centimètre »*, conclut Marc Espié, responsable du centre des maladies du sein de cet hôpital parisien. ■ **Jean-Philippe Braly**

[1] A. Bleyer et G. Welch, *NEJM*, 367, 1998, 2012

GREFFE DE REIN *Un mécanisme de rejet vient d'être identifié*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Olivier Thaunat est spécialiste de transplantation rénale au CHU de Lyon, et membre du réseau de recherche en transplantation Centaure.

L'identification d'un nouveau mécanisme immunitaire responsable de rejets de greffe de rein pourrait permettre d'améliorer les transplantations [1]. De quel mécanisme s'agit-il ?

O.T. Chez certains malades à qui l'on transplante un rein, le système immunitaire se met à agresser les artères qui irriguent le greffon. On sait depuis longtemps que ces rejets, dits « vasculaires », sont plus sévères que les rejets appelés « cellulaires », liés à l'action de certains globules blancs contre le greffon : ils doublent le risque de perdre le rein greffé. En outre, ils ont difficiles à traiter par corticostéroïdes, efficaces contre les rejets cellulaires. Pilotée par Xavier Jouven, du centre de recherche cardiovasculaire de Paris, cette étude sur l'homme montre que 71 % des rejets vasculaires relèvent en fait de l'autre grande catégorie de rejet : le rejet « humoral », dû à l'action de certains anticorps du receveur. Cette découverte pourrait contribuer à la modification de la classification internationale des types de rejet dans le domaine de la transplantation rénale.

Comment l'équipe l'a-t-elle mise à jour ?

O.T. La force de leur travail réside d'abord dans le nombre de patients étudiés : 2 079 transplantés rénaux ont été suivis pendant six ans dans de grands hôpitaux parisiens. Sur cette période, 302 d'entre eux ont fait un rejet aigu du greffon. L'équipe a alors récupéré les résultats d'examens effectués sur ces patients : symptômes, lésions des tissus du greffon, marqueurs d'inflammation vasculaire, présence de globules blancs et d'anticorps dirigés contre le greffon, etc.

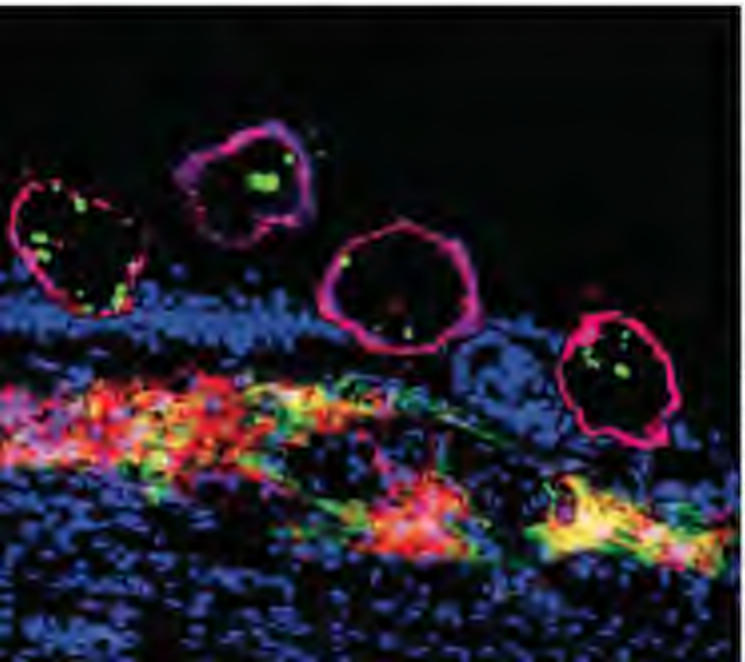
En croisant ces données grâce à un outil statistique performant, l'équipe a découvert que 64 des 90 cas de rejets vasculaires identifiés étaient attribuables à l'action des anticorps. Chez ces 64 patients, le risque de perdre le greffon était jusqu'à neuf fois supérieur : au bout de six ans, près de 50 % d'entre eux l'avaient perdu.

Grâce à cette découverte, ces patients seront-ils mieux soignés ?

O.T. Ces patients seront mieux pris en charge grâce aux nouvelles techniques détectant ces anticorps – et au développement de traitements les ciblant de manière plus efficace. De fait, l'étude montre que le diagnostic d'un mauvais type de rejet peut conduire à un traitement inadapté, et à un risque plus élevé de perdre le greffon.

Sur ces 64 patients, 29 avaient été classés dans la catégorie « rejet cellulaire » ; ils avaient donc reçu un traitement inadapté, ciblant les globules blancs. Les autres avaient été classés de façon juste en « rejet humoral » et avaient donc reçu un traitement ciblant les anticorps. Résultat : le taux de survie de leur greffon était 40 % plus élevé. ■ **Propos recueillis par J.-P.B.**

[1] C. Lefaucheur *et al.*, *The Lancet*, doi:10.1016/S0140-6736(12)61265-3, 2012.



© B. COMBADIÈRE-INSERM

En bref

FABRICATION EN MUSIQUE

La musique est un art mais aussi un langage à part entière. En utilisant la musique, une collaboration mêlant des chimistes, des ingénieurs, un mathématicien et un compositeur est parvenue à synthétiser de nouvelles variétés de fil d'araignée, un matériau particulièrement difficile à imiter, car constitué de blocs de protéines précisément agencés. Les chercheurs ont donné une traduction sonore au modèle mathématique simulant l'évolution des divers agencements des protéines et sont parvenus à discerner, à l'oreille, les conformations intéressantes.

J. Wong *et al.*, *Nano Today*, doi: 10.1016/j.nantod.2012.09.001, 2012.

ROBOT ARNAQUEUR

Un écureuil entasse sa nourriture dans des cachettes puis effectue des rondes pour vérifier que ses garde-manger sont indemnes. Il répète ce comportement sans cesse, sauf si un autre écureuil se met à le surveiller. Il change alors de stratégie et patrouille autour de cachettes vides. Des chercheurs se sont inspirés de ce comportement, et d'autres observés chez les oiseaux, pour créer des logiciels d'intelligence artificielle rendant des robots capables de changer de stratégie, de comportement, de mission, lorsqu'ils détectent un intrus.

C. Arkin *et al.*, *Intelligent Systems, IEEE*, 27, 60, 2012.

sur le web

http://massoudhassani.blogspot.fr/

Le site de Massoud Hassani, Afghan qui a inventé un ingénieux système pour détruire, par la seule grâce du vent, les mines antipersonnelles laissées dans les zones de conflit.

ARMEMENT *Un drone intégralement*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DASSAULT AVIATION

Bruno Stoufflet est directeur de la prospective à Dassault aviation.

Le 1er décembre 2012, le démonstrateur du premier drone de combat européen, Neuron, chez Dassault aviation, s'est envolé de la base aérienne d'Istres. Comment a-t-il été conçu ?

B.S. La conception du Neuron a largement fait appel à l'informatique. Son aérodynamisme, sa forme, sa furtivité, l'absence de dérive, ou encore le contrôle latéral de l'avion, tout a été conçu grâce à des simulations numériques. Pour valider les concepts, nous nous sommes contentés de quelques tests en soufflerie, avec des maquettes de petite taille. De plus, comme ce projet concernait près de 300 personnes dans six pays européens, nous avons mis en place une plate-forme de travail commune. En fonction de leurs droits d'accès, les collaborateurs pouvaient se connecter à tout ou partie du prototype virtuel de Neuron afin de le

© ONERA

D'une envergure de 2,50 mètres, cette maquette de Neuron, cinq fois plus petite que le démonstrateur final, fait l'objet d'essais en soufflerie.

S'achemine-t-on vers des transistors 10 000

COMPOSANTS

Dans certaines conditions, un isolant électrique peut transmettre et arrêter un courant électrique 10 000 fois plus vite qu'un semi-conducteur.

Les transistors contrôlent le courant électrique. Ils le stoppent et le propagent comme des interrupteurs. Toutefois, ils ne réagissent pas instantanément à la commande. Il faut du temps pour que les matériaux qui les composent – des semi-conducteurs – arrêtent ou transmettent le signal. Résultat : un transistor ne peut pas fonctionner à des vitesses supérieures au térahertz (10^{12} hertz), ce qui est l'un des facteurs limitant la vitesse de calcul des ordinateurs. En tout cas jusqu'à présent, car une équipe allemande de l'institut Max Planck d'optique quantique de Garching, en Allemagne, a découvert une façon de transmettre un signal électrique 10 000 fois plus vite que dans les transistors actuels [1]. Pour y parvenir, elle a utilisé un isolant, appelé « diélectrique ».

Deux bandes. *« La nature conductrice ou isolante d'un matériau dépend des états possibles des électrons dans le solide »*, explique Manuel Joffre, du laboratoire d'optique et biosciences, de l'École polytechnique. En effet, dans ce type de matériaux, la conduction électrique est assurée par des électrons dits « libres ».

Leur énergie peut varier continûment, mais seulement à l'intérieur de deux « bandes d'énergie » : la bande de valence et la bande de condution. Si cette dernière est naturellement remplie en partie, les électrons peuvent facilement circuler : le matériau est conducteur.

En revanche, *« si la bande de conduction est vide et qu'elle est énergétiquement très proche de celle de valence, alors, le matériau est un semi-conducteur*, continue Jérôme Tignon, du laboratoire Pierre-Aigrain, de l'École normale supérieure de Paris. *Enfin, si l'écart entre les deux bandes est grand, il s'agit d'un isolant »*.

Ici, les chercheurs ont réussi à générer un courant électrique dans un isolant,

conçu grâce à des simulations numériques

modifier en temps réel. Enfin, ce drone devrait pouvoir se diriger automatiquement, sous la simple surveillance d'un opérateur situé au sol. Nous avons donc réalisé un banc système permettant à l'opérateur de tester virtuellement, donc sans risque, le comportement de l'appareil, et ce, avant même que le démonstrateur ne vole.

Pourquoi avoir construit un démonstrateur technique et non un prototype ?

B.S. Un démonstrateur est moins contraignant à fabriquer car il répond à des conditions d'emploi moins strictes que celles d'un prototype : il ne volera que deux ans et demi. Il s'agit de s'assurer de la maîtrise de certaines technologies sans avoir à prendre en compte l'industrialisation pour une série, la maintenance en opération et les fonctionnalités qu'un drone de combat sous sa forme aboutie présenterait. Cela permet d'alléger les coûts. Au final, Neuron aura coûté 400 millions d'euros. À titre de comparaison, le prototype du dernier avion de combat français avait coûté plusieurs milliards.

Neuron est donc une sorte de laboratoire volant. Que permettra-t-il de tester ?

B.S. Il permettra d'abord de vérifier le niveau de furtivité de l'appareil. Si nos calculs sont exacts, la forme de Neuron et la matière absorbante dont il est en partie recouvert devraient le rendre indétectable pour les radars actuels. Seuls les Américains ont à ce jour un démonstrateur comparable. En outre, contrairement aux drones d'observation, dont la principale fonction est de se maintenir en l'air le plus longtemps possible pour surveiller un secteur, les drones de combat embarquent un armement. Nous avons donc développé un système de soute capable de s'ouvrir à des vitesses subsoniques (mach 0,8) pour lâcher une bombe par exemple. Enfin, le drone est équipé de capteurs de détection pour surveiller son environnement sans pour autant dégrader la furtivité de l'appareil.

Les avions militaires de demain seront-ils des drones de ce type ?

B.S. Je le pense, mais tout le monde n'est pas de cet avis. C'est pour cela qu'il était important de construire ce démonstrateur. Cela permettra aux personnes réticentes de peut-être mieux percevoir l'intérêt de ces drones. ■ **Propos recueillis par Viviane Thivent**

fois plus rapides ?

de la silice amorphe. Ils ont utilisé un laser femtoseconde, instrument capable de produire des impulsions laser de courte durée. *« L'énergie transportée par le faisceau laser reste modérée, mais la brièveté des impulsions permet d'atteindre une densité de photons considérable »*, poursuit Manuel Joffre. Cette densité engendre dans la silice un champ électrique alternatif de grande amplitude, assez puissant pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction et produire un courant électrique contrôlé par l'impulsion lumineuse.

D'après des expériences complémentaires effectuées à l'aide d'impulsions attosecondes, environ 1 000 fois plus brèves, la vitesse à laquelle l'isolant répond au signal est 10 000 fois plus rapide que dans le cas d'un semi-conducteur. Un point qui ouvre la voie à la fabrication de nouveaux composants électroniques capables de travailler dans le domaine du pétahertz (10^{15} hertz). Mais *« il faudra des années de recherche et développement pour éventuellement transformer cet effet physique en un dispositif pratique »*, nuance Manuel Joffre. Et Jérôme Tignon de conclure : *« Cette découverte pourra au minimum déboucher sur la création d'instruments de recherche. »* ■ **V.T.**

[1] A. Schiffrin *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature11567, 2012 ; M. Schultze *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature11720, 2012.

© FACULTY OF ENGINEERING CHRISTIAN ALBRECHTS UNIVERSITY OF KIEL

zoom Ce matériau alerte sur son état de stress

Les tétrapodes d'oxyde de zinc, présentés pêle-mêle sur ce cliché, ont permis à une équipe allemande de créer un matériau capable d'indiquer lui-même, par un signal lumineux, où il subit un stress mécanique. Pour y parvenir, les chercheurs ont donné à l'oxyde de zinc une forme à quatre branches pour lui conférer une certaine élasticité. Puis ils ont utilisé les propriétés de photoluminescence de l'oxyde de zinc. Éclairé dans le domaine de l'ultraviolet, ce composé réémet des lumières bleu-vert. Les chercheurs ont placé ces tétrapodes d'oxyde de zinc dans une matrice en polymère et ont étiré l'ensemble sous une lumière ultraviolette. Ils ont ainsi montré que le matériau émet plus de lumière bleue lorsqu'il est déformé.

X. Jin *et al.*, *Adv. Mater.*, doi : 10.1002/adma.201203849, 2012.

À surveiller

GRAND ÉQUIPEMENT

La construction du *European spallation source* (ESS), un générateur de neutrons destiné à la recherche, se précise. Après la désignation du gagnant du projet d'architecture, un grand achat d'équipement est prévu au premier trimestre 2013. Les premiers travaux de construction ne seront, eux, entamés que début 2014, sur le site de Lund, en Suède. L'ESS utilisera la technique de *spallation*, qui, en mode pulsé, permet aux expérimentateurs de connaître avec précision la vitesse des neutrons envoyés sur différentes cibles afin d'en étudier la structure. Tout cela avec une intensité par impulsion 30 à 50 fois plus importante que les plus intenses sources traditionnelles.

Une façon unique de produire des noyaux rigides

L'accélérateur ALTO va être inauguré à Orsay. Il permet de produire des noyaux atomiques riches en neutrons par un mécanisme unique au monde.

L'Accélérateur linéaire auprès du tandem d'Orsay (ALTO) sera inauguré fin mars 2013. Installé à l'institut de physique nucléaire d'Orsay (IPN), il a été financé à hauteur de 1 million d'euros par la région Île-de-France, le département de l'Essonne, le CNRS et le ministère de la Recherche. Son objectif ? Produire des éléments chimiques particulièrement stables, possédant 50 neutrons. D'ailleurs, avant même son inauguration, il a déjà permis d'obtenir, entre autres, des formes du nickel et du zinc (des isotopes) – le nickel-78 et le zinc-80 –, que l'on ne retrouve naturellement que dans le cœur des étoiles.

Ce type d'isotope est particulièrement intéressant pour la recherche. Ils sont dits rigides, car ils se comportent presque comme des atomes stables, qui ne se désintègrent pas spontanément, alors que leur surplus de neutrons devrait rendre leur noyau très radioactif. Les chercheurs d'Orsay veulent pouvoir étudier cette rigidité lorsqu'elle survient pour des isotopes qui possèdent beaucoup plus de neutrons que leur version stable.

L'accélérateur ALTO fournit déjà des informations sur des éléments chimiques qui n'existent pas naturellement sur Terre. © L. PETZOLD/IPN/CNRS

Pour obtenir ces isotopes, il faut bombarder une cible en uranium avec un faisceau de particules afin de provoquer un phénomène de fission. Les atomes d'uranium se décomposent alors en deux atomes fils différents. Mais ALTO a une caractéristique qui le rend unique au monde : cet accélérateur utilise des photons. *« Normalement, ce sont des neutrons qui sont accélérés pour percuter la surface de la*

© S. BELAMARI, CNRM-GAME (MÉTÉO-FRANCE ET CNRS)

Des chercheurs procèdent au lâcher d'un ballon-sonde en mer, qui permet de mesurer, au cours de son ascension, les paramètres météorologiques.

L'action du mistral sur l'eau de mer

Un navire de recherche bardé de ballons et de sondes scrutera prochainement les eaux du golfe du Lion.

Quelle influence peut avoir le mistral sur les fonds marins ? La seconde campagne de l'*Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment* (HyMeX), pilotée par le CNRS et Météo France, va se pencher sur les interactions à l'interface de la Méditerranée et de l'atmosphère. Du 1er février au 15 mars 2013, un navire de recherche équipé de ballons et de sondes scrutera les eaux denses du golfe du Lion. Ces eaux se forment sous l'action des vents locaux. *« Le mistral et la tramontane provoquent une évaporation à la surface de la mer qui augmente sa salinité*, explique Véronique Ducrocq, du Centre national de recherches météorologiques. *L'eau se densifie et coule vers les fonds marins, ce qui les oxygène et fait remonter des nutriments. »* Ce phénomène de convection est essentiel à l'écosystème du golfe, d'où le vif intérêt des chercheurs. ■ **M. K.**

cible en uranium afin de provoquer sa fission, explique Faiçal Azaiez, directeur de l'IPN. *Ici, le freinage d'un faisceau d'électrons au sein d'un convertisseur entraîne la production de photons. C'est ce rayonnement qui déclenche la formation de nouveaux isotopes. On parle de photofission.* » Cette nouveauté tranche par rapport au vieil accélérateur Tandem, situé dans les mêmes locaux, qui ne fournit que des rayonnements d'ions stables. ■ **Martin Koppe**

AVIS SUR LES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS

L'Autorité européenne de sécurité des aliments émettra en mars un avis scientifique sur le bisphénol A et d'autres perturbateurs endocriniens. Elle y compilera les publications disponibles sur les effets sur la santé de ces molécules qui perturbent le système hormonal de l'organisme. Et évaluera *« des approches possibles pour les identifier ainsi que des méthodes pour évaluer les dangers qu'elles peuvent représenter. »*

MÉDICAMENTS FICHÉS

L'Agence du médicament mettra à la disposition du public, début 2013, une base de données sur les médicaments. Appelée de ses vœux par Roselyne Bachelot en 2008, celle-ci reprendra les caractéristiques des médicaments (efficacité, intérêt thérapeutique, etc.) et leur évaluation, à la manière du *Vidal*, qui est une initiative privée et destinée aux médecins.

© J. KIKIN & M.-L. HUBERT/BIOSPHOTO

L'ours polaire est menacé par le changement climatique, qui entraîne la dislocation de la banquise, comme ici à Svalbard, dans l'Arctique. Sa protection en prohiberait la chasse, source de revenus des Inuits du Canada.

L'ours polaire menacé d'extinction ?

En mars 2013, l'ours polaire pourrait officiellement rejoindre l'appendice I de la Convention de Washington, réunissant les espèces animales et végétales les plus menacées du monde.

Du 3 au 14 mars 2013, se tiendra la conférence de Bangkok où les délégués de 176 pays décideront du statut de 71 espèces animales et végétales. Les États-Unis ont ainsi proposé d'indexer *Ursus maritimus*, l'ours polaire, à l'appendice I de la Convention sur le commerce international des espèces sauvages. Cette catégorie rassemble les espèces menacées d'extinction pour lesquelles tout commerce international est interdit. Selon les États-Unis, le changement climatique et la fonte de la banquise constituent les principales menaces pour l'ours polaire. Ces changements de statut feront l'objet de débats lors d'une évaluation préliminaire prévue entre fin janvier et début février 2013. Comme en 2010, à Doha, le Canada s'oppose à la proposition des États-Unis, la chasse et le commerce de l'ours polaire représentant une source de revenus importante pour les peuples locaux comme les Inuits. ■ **Gautier Cariou**

Le stockage radioactif en débat

Les premières réunions de débat public concernant le projet Cigéo, installation destinée à stocker les déchets radioactifs français à 500 mètres de profondeur, vont débuter.

Le projet de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs sera soumis, courant 2013, à un débat public comme le prévoit la loi de 2006. Les premières discussions se tiendront en Meuse et en Haute-Marne, départements sélectionnés pour accueillir l'installation de stockage profond de déchets nucléaires. Les réunions accueilleront de 50 à 300 personnes et mêleront citoyens et experts indépendants. Chacun pourra réagir et donner son opinion sur le projet. En outre, le site Internet www.debatpublic-cigeo.org sera bientôt disponible et proposera une documentation riche, ainsi qu'un espace de débat pour tous. ■ **G. C.**

Acteurs

Nominations du mois

Minalogic

PHILIPPE WIECZOREK,

44 ans, est nommé directeur du groupe logiciel du pôle de compétitivité Minalogic. Son rôle sera d'intégrer plus largement le secteur du logiciel aux activités du pôle. Ingénieur diplômé de l'INSA de Lyon, il était auparavant secrétaire général du comité de direction des sites internationaux de HP France.

LEEM

HERVÉ GISSEROT

est élu à 48 ans président du LEEM, l'organisation professionnelle des entreprises du médicament. Il est senior vice-président du laboratoire GlaxoSmithKline pour une partie de l'Europe et président de l'association des laboratoires internationaux de recherche depuis 2011. Diplômé de l'Institut d'études politiques de Paris, il a occupé différentes fonctions entre 1998 et 2008 chez Sanofi.

IRD

GILLES PISON,

61 ans, est nommé président du conseil scientifique de l'Institut de recherche pour le développement (IRD). Professeur au Muséum national d'histoire naturelle, directeur de recherche à l'INED, il préside le comité sur les conséquences démographiques des interventions sanitaires de l'Union internationale pour l'étude scientifique de la population.

Nomination

Pierre Cox

L'astronome français Pierre Cox est nommé directeur du radiotélescope ALMA, basé au Chili.

L'astronome Pierre Cox prendra en avril ses fonctions de directeur de l'Atacama Large Millimeter Array (ALMA), un radiotélescope situé à 5 000 mètres d'altitude sur le plateau de Chajnantor, au nord du Chili. Cette collaboration internationale a pour but de capter des rayonnements dans des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, afin d'observer les premières galaxies et de comprendre la formation des planètes et des étoiles.

En 25 ans de recherches sur ces sujets, Pierre Cox a signé plus de 200 articles. *« C'est un chercheur remarquable,* note Alain Omont, directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris. *Il a publié des articles très cités, notamment sur l'émission infrarouge de notre Galaxie, ainsi que sur des galaxies infrarouges et des quasars comptant parmi les objets les plus lointains que l'on connaisse. »* Après avoir travaillé à l'institut Max Planck, en Allemagne, puis à l'observatoire de Marseille et à l'institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, Pierre Cox intègre l'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) à Grenoble en 2005, et en devient directeur en 2006.

« Il sait s'entourer des meilleurs collaborateurs et les faire travailler ensemble de façon efficace », assure Alain Omont, qui compare l'IRAM à un modèle réduit d'ALMA. Pierre Cox endossera son nouveau rôle dans une période de transition : *« Le but est d'amener l'observatoire à fonctionner pleinement, une fois sa construction terminée en fin d'année,* explique-t-il. *Une quinzaine d'antennes restent à installer, et tous les modes d'observation n'ont pas encore été testés. Mon rôle sera de mener à bien cette transition et d'assurer qu'ALMA permette les avancées majeures dont rêve la communauté scientifique. »* ■ Antoine Cappelle

Et aussi

Pascal Cléré est élu président de l'institut de recherche technologique SystemX.

Récompensés

Caroline Dive, professeur de pharmacologie à l'université de Manchester, en Angleterre, reçoit le prix Pasteur-Weizmann/Servier pour ses avancées en cancérologie dans le domaine du développement des biomarqueurs circulants.

Brigitte Kieffer, directrice de l'institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire à Illkirch, dans le Bas-Rhin, reçoit le prix Lamonica de neurologie (125 000 €) pour ses travaux sur les mécanismes d'action des substances opiacées.

Le Prix des frontières de la physique, remis par la Fondation du prix de physique fondamentale, est décerné à **Charles Kane,** de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, **Laurens Molenkamp,** de l'université de Wurtzbourg, en Allemagne, et **Shoucheng Zhang,** de l'université Stanford, aux États-Unis, pour la prédiction et la découverte des isolants topologiques ; **Alexander Polyakov,** de l'université de Princeton, aux États-Unis, pour ses découvertes sur la théorie des champs et des cordes, et **Joseph Polchinski,** de l'institut Kavli de physique théorique, aux États-Unis, pour ses contributions à la théorie quantique des champs et à la théorie des cordes.

Disparus

FARISH JENKINS, paléontologue américain, est décédé le 11 novembre à 72 ans. Spécialiste de l'anatomie comparée et de l'évolution, il était connu pour ses travaux sur la physiologie de la respiration et le vol des oiseaux.

JOSEPH MURRAY est mort le 26 novembre à 93 ans. Prix Nobel de médecine en 1990 pour ses travaux sur la transplantation d'organes, ce chirurgien américain avait réalisé la première greffe de rein en 1954.

© DR - FOUR ESO

CRIC Cooperative Research Innovation Conference

FRANCE CHINE / PARIS 2013

Mardi 14 mai 2013
CCI Paris Ile-de-France

Organisé par

La Recherche — CCI PARIS ILE-DE-FRANCE

Inscrivez-vous dès à présent !

La dynamique franco-chinoise au service de l'innovation

- Quel est le panorama et l'organisation de la R&D en Chine ?
- Comment appréhender la dynamique chinoise ?
- Quels sont les mécanismes de coopération avec la France ?

Avec la participation exceptionnelle de :

Madame Geneviève FIORASO, Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

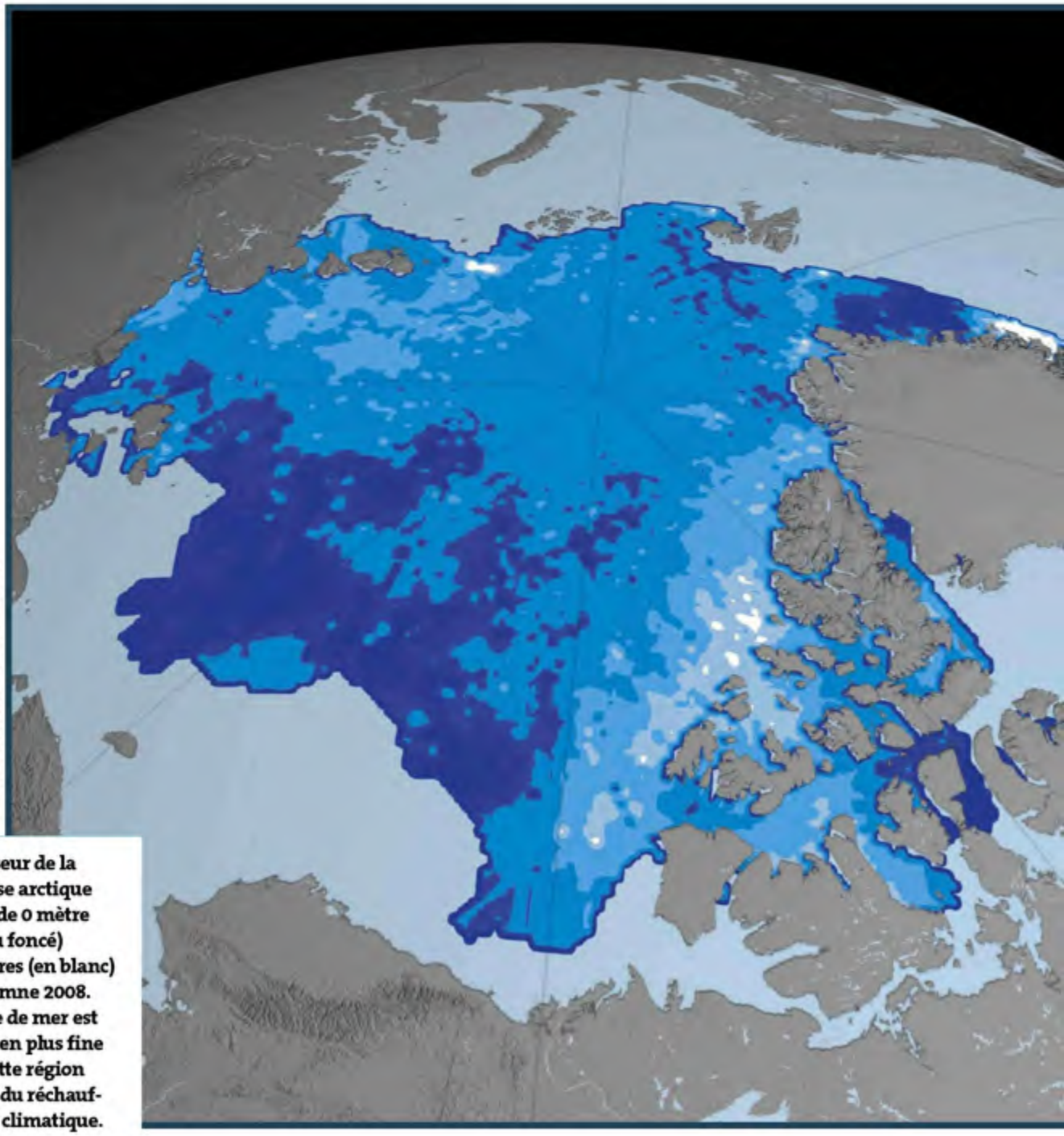
Et notamment les interventions de :

- **Jean-Luc BEYLAT**
  Président, Alcatel-Lucent Bell Labs France
  Président, Pôle Systematic
- **Jun HAN**
  Conseiller pour la science et la technologie,
  Ambassade de la République Populaire de Chine à Paris
- **Jochen LANGHEIM**
  Vice-Président R&D, STMicroelectronics en Chine
- **Florence LELAIT**
  Adjointe Département des affaires européennes et internationales,
  Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
- **Lingai LUO**
  Directrice de recherche, CNRS de Nantes
- **Jean-François MINSTER**
  Directeur scientifique, Total
- **Patrick NEDELLEC**
  Directeur du bureau CNRS en Chine
- **François QUENTIN**
  Président directeur général, Huawei France
- **Ping ZHANG**
  Professeur, Université de Pékin

INFORMATIONS ET INSCRIPTIONS : chine2013@larecherche.fr

En partenariat avec île de France, Agence Régionale de Développement

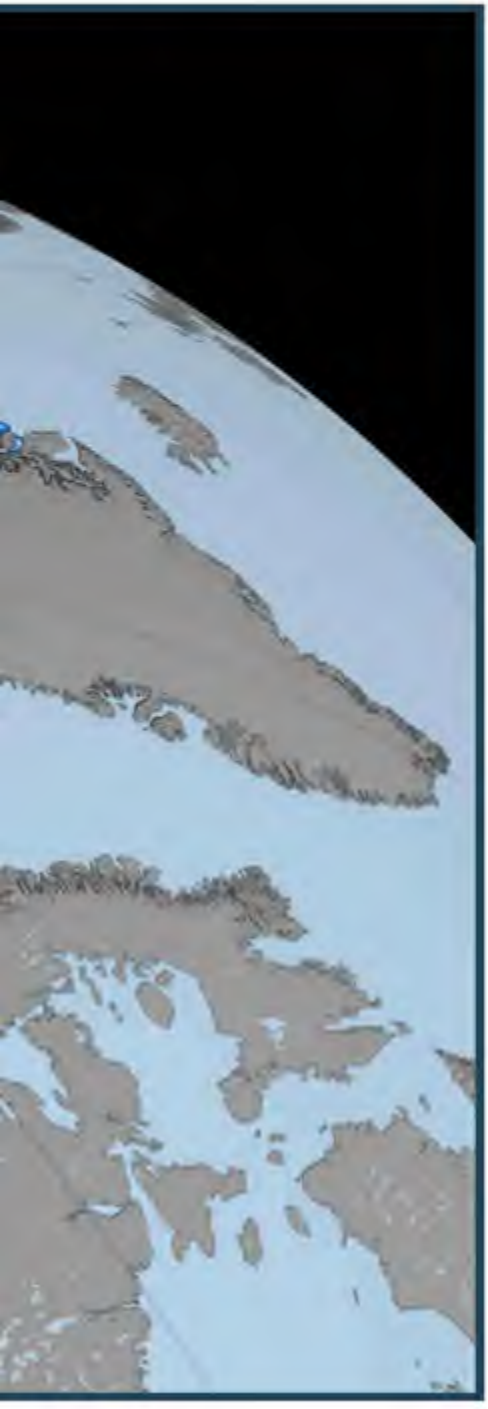
Réchauffement ce qui nous attend



©NASA/GSFC-SVS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/COSMOS

L'épaisseur de la banquise arctique variait de 0 mètre (en bleu foncé) à 5 mètres (en blanc) à l'automne 2008. La glace de mer est de plus en plus fine dans cette région à cause du réchauffement climatique.

climatique : vraiment



Dans quelques mois, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat publiera son cinquième rapport. Le contenu détaillé est encore confidentiel, mais on sait déjà que les prévisions diffèrent peu de la précédente livraison. Plus les climatologues affinent leurs modèles, plus ils confirment que les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines sont responsables d'un réchauffement global rapide. Malgré cela, les « climatosceptiques » continuent à crier à la manipulation. Mais que dit vraiment la science ? Et de quelles preuves dispose-t-on ?

1 **Valérie Masson-Delmotte : « On peut encore limiter la hausse à 2 °C »**
Propos recueillis par Denis Delbecq

2 **Une meilleure modélisation du climat** Par Denis Delbecq

3 **Répit pour la température globale**
Par Fabienne Lemarchand

4 **Quelles émissions de gaz à effet de serre faut-il réduire ?**
Par Benjamin Dessus, avec Bernard Laponche et Hervé Le Treut

1 • VALÉRIE MASSON-DELMOTTE : « On peut encore limiter la hausse à 2 °C »

Entretien La Terre se réchauffe, les vagues de chaleur intense sont plus nombreuses dans l'hémisphère Nord, le niveau de la mer monte : le changement du climat global est indéniable. Prendrons-nous à temps les mesures nécessaires pour en limiter l'ampleur ?

Valérie Masson-Delmotte est paléoclimatologue au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement du CEA, responsable du thème de recherche « dynamique et archives du climat ». Elle est coauteur de *Climat, le vrai et le faux*, paru en 2011 aux éditions Le Pommier, et a contribué à l'ouvrage collectif *Des climats et des hommes*, paru en 2012 aux éditions La Découverte.

LA RECHERCHE : Fin octobre, le cyclone Sandy a fait de lourds dégâts sur Haïti et sur le nord-est des États-Unis. Peut-on attribuer cet événement au réchauffement climatique ?

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE : On ne peut établir de lien direct entre un phénomène donné et l'évolution du climat. On peut, bien sûr, se demander si les conséquences des ouragans ne sont pas amplifiées par l'élévation du niveau des océans : une tempête de force donnée produit plus d'effets sur les côtes avec une mer plus haute. De la même manière, on sait qu'une atmosphère réchauffée d'un degré contient environ 7 % d'humidité en plus. Cela peut expliquer les précipitations accrues lors de phénomènes extrêmes, que l'on l'observe en particulier en Amérique du Nord, en Europe centrale et en Asie du Sud. Sandy n'avait pas une intensité exceptionnelle. Le cyclone était très étendu et, surtout, il a suivi une trajectoire inhabituelle. Certains scientifiques américains voudraient l'expliquer par une modification de la circulation atmosphérique en relation avec la forte réduction des glaces arctiques cet été, mais ce point est très débattu.

Depuis une dizaine d'années, la température globale de la Terre n'augmente plus de façon marquée. Peut-on en conclure que les modèles, qui prévoient un réchauffement, sont erronés ?

V.M.-D. Il est vrai qu'il y a un plateau depuis une dizaine d'années dans l'évolution de la température moyenne du globe, comme cela a déjà été observé dans le passé. Il s'explique par la conjonction de facteurs naturels et anthropiques, en particulier par la variabilité intrinsèque du climat. Ce n'est pas incohérent avec les projections des modèles. Le changement climatique se manifeste également dans d'autres paramètres, comme la montée du niveau des mers, le retrait de la banquise en Arctique, qui ont accéléré ces dernières années, l'augmentation de la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur et les modifications du cycle hydrologique.

Qu'a-t-on appris depuis le précédent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), en 2007 ?

V.M.-D. Le prochain rapport reposera sur des articles soumis aux revues scientifiques avant juillet 2012 et qui seront acceptés pour publication avant mars 2013. L'essentiel des résultats sur lequel il s'appuiera est donc déjà connu de la communauté scientifique. De nombreux travaux récents confirment ce que l'on savait du réchauffement climatique, et notamment son ampleur au XX^{e} siècle. L'exercice « sceptique » qui consistait à réexaminer l'ensemble des observations brutes pour recalculer l'évolution de la tempéra-

L'essentiel

> LES RÉSULTATS sur lesquels s'appuiera le prochain rapport sur le changement climatique sont déjà connus des scientifiques.

> ILS CONFIRMENT que la Terre s'est réchauffée au XX^{e} siècle et que les vagues de chaleur et le cycle de l'eau ont aussi été modifiés.

> IL APPARTIENT À LA SOCIÉTÉ ET AUX GOUVERNEMENTS de décider des mesures à prendre pour limiter ces changements.

© MARC DELMOTTE

ture globale à la surface des continents a été fait, confirmant les résultats précédents. Il y a aussi un constat beaucoup plus clair sur les vagues de chaleur avec une récurrence d'événements de très forte intensité l'été dans l'ensemble des continents de l'hémisphère Nord. Les modèles de climat vis-à-vis du cycle de l'eau montrent une amélioration de leurs performances. Mais il reste de nombreuses incertitudes, en particulier concernant les interactions entre les nuages et les aérosols, que ce soit pour le climat récent ou pour son évolution future.

On a l'impression que les modèles ont peu évolué en six ans, même si certains mécanismes sont mieux pris en compte, comme le rôle de la végétation et des aérosols. Comment l'expliquer ?

V.M.-D. Il faut une dizaine d'années pour mettre au point une nouvelle génération de modèles. Avant de modéliser un phénomène, il faut d'abord l'observer. Et donc mettre au point des instruments, les déployer, puis analyser les données avant de construire une nouvelle représentation des phénomènes. Tout cela prend du temps. Le rythme de la science n'est pas forcément celui du GIEC ! Récemment, une équipe de l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse, a compilé les projections sur le XXIe siècle de plusieurs dizaines de modèles et comparé les derniers résultats aux simulations des versions précédentes [1]. On constate que les progrès dans la modélisation n'ont pas permis de réduire les incertitudes. Ils ne les ont pas non plus augmentées, alors qu'on a introduit de nouveaux mécanismes. La gamme de changement de température moyenne simulée par les modèles numériques à la surface du globe pour un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone est cohérente avec les résultats issus de l'étude des climats passés.

Les émissions de carbone continuent de grimper et placent le climat sur la trajectoire la plus pessimiste modélisée par le GIEC…

V.M.-D. Il est vrai qu'aujourd'hui, avec l'usage croissant du charbon, du pétrole et l'arrivée des gaz non conventionnels, il y a largement assez de ressources fossiles pour nous conduire au-delà de 4 °C de hausse de température en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle (3,2 °C au-dessus du niveau actuel). Dans cette hypothèse haute, le changement climatique projeté par les modèles produit des climats très différents de ceux connus au cours de la période historique : pour atteindre de tels niveaux de réchauffement, il faut remonter 125 000 ans en arrière dans l'Arctique et bien au-delà pour les régions tropicales. Et cette fois, l'évolution se fait en un siècle, et non plus en milliers d'années. Dans le cadre des négociations internationales sur le climat, les gouvernements avaient fixé à Copenhague l'objectif de limiter le réchauffement à 2 °C. Cela reste à notre portée, comme le montre l'un des scénarios – le plus optimiste – du prochain rapport du GIEC, qui suppose une maîtrise des rejets de gaz à effet de serre d'ici à 2020. Il faudra pour cela mieux étudier les poids respectifs des différents gaz impliqués dans le réchauffement, et notamment renforcer nos connaissances sur le méthane (rejeté par les activités humaines, et aussi par les sols de l'Arctique au fur et à mesure qu'ils dégèlent), et sur les oxydes nitreux. Le rôle des scientifiques est de comprendre les mécanismes des changements climatiques et d'évaluer les risques climatiques futurs pour éclairer les choix de société. Mais c'est à la société et aux responsables politiques de décider.

■ **Propos recueillis par Denis Delbecq**

[1] Reto Knutti et Jan Sedlacek, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/NCLIMATE1716, 2012.

2 • Une meilleure modélisation du climat

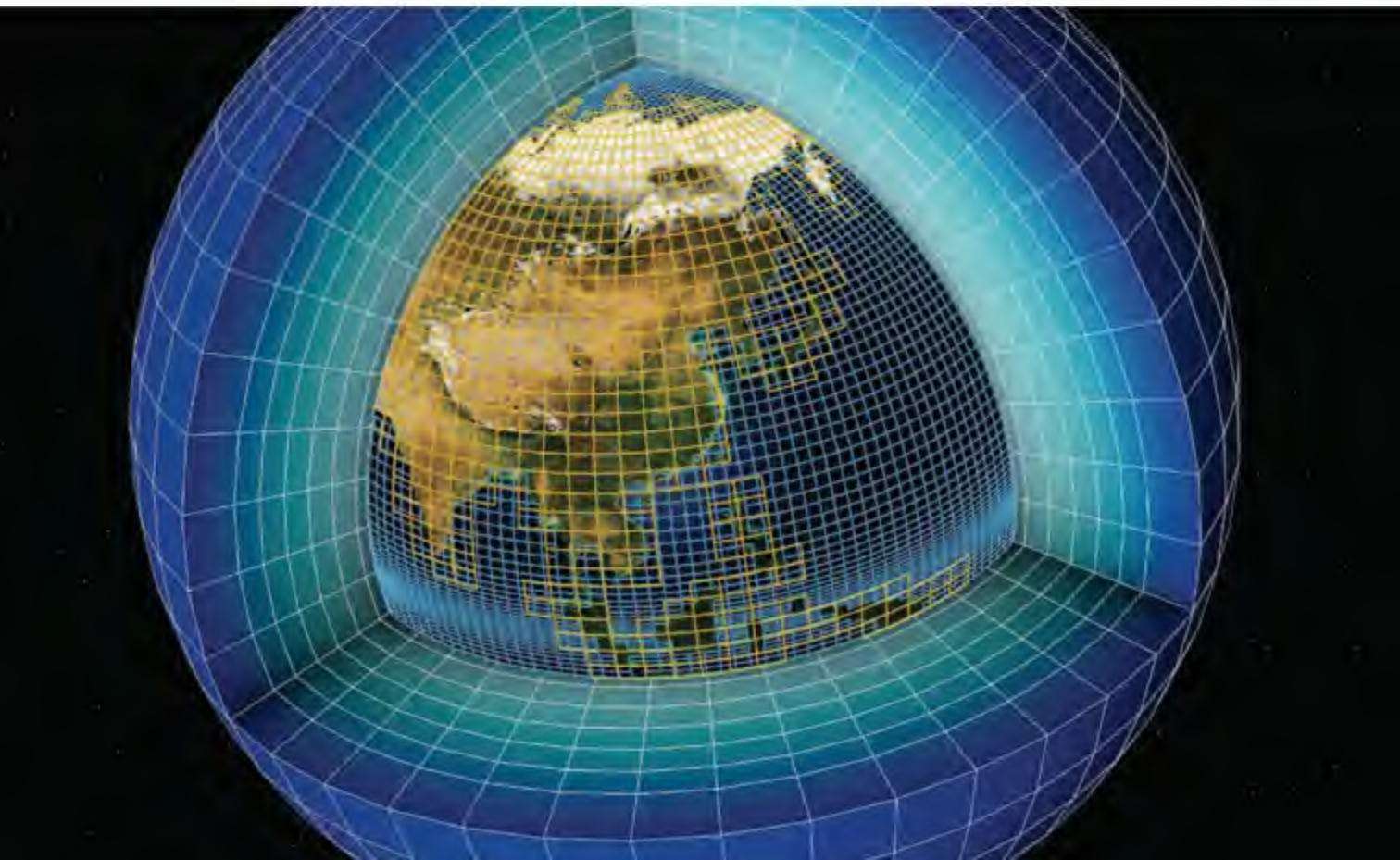
Simuler l'évolution du climat jusqu'en 2100 revient à calculer l'état de la planète toutes les 20 à 30 minutes d'ici là. Comment les climatologues améliorent-ils leurs méthodes pour des prévisions plus précises ?

PAR **Denis Delbecq,**
journaliste.

En septembre 2013, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) livrera la première partie de son cinquième rapport d'évaluation. Elle contiendra la synthèse des plus récentes modélisations sur l'évolution des paramètres physiques du climat d'ici à 2100 : températures, précipitations, phénomènes extrêmes, etc. Les deux autres parties, celle concernant l'impact de ces changements climatiques sur les systèmes naturels et socio-économiques, et celle sur les solutions possibles pour lutter contre ces changements, seront publiées dans les mois suivants.

Au fil des années, les climatologues ont appris à décrire de plus en plus fidèlement les mécanismes qui gouvernent l'évolution des océans et de l'atmosphère. D'abord, parce que les progrès de l'informatique ont permis d'affiner la description de la planète. Ensuite, parce que de nouveaux phénomènes, encore mal décrits jusque-là, ont été pris en compte. Le contenu du rapport 2013 est encore confidentiel, mais on connaît déjà les tendances. Et, surtout, plusieurs changements importants ont été introduits dans son élaboration.

Pour modéliser le climat, les géophysiciens découpent l'atmosphère et l'océan en centaines de milliers de petites boîtes. Dans chacune d'elles, ils considèrent que les grandeurs physiques et chimiques sont homogènes. Pour l'atmosphère, ce sont la température, le vent, la pression, la nébulosité et



les précipitations. Pour l'océan, ils s'intéressent à la température, aux courants et à la salinité.

Comme le climat est un phénomène dynamique, il faut conduire les calculs pas à pas, à partir d'un état initial. Ainsi, pour les projections climatiques du XXIe siècle, les calculs partent de l'état de l'atmosphère et des océans en 2005, calculé en fonction des connaissances et des reconstitutions historiques depuis 1850. À partir de cet état initial, qui correspond au 1er janvier 2005, on calcule les variables physiques qui décrivent l'état de chaque boîte élémentaire de 20 à 30 minutes plus tard. On obtient ainsi un nouvel état initial pour le calcul suivant. Sur un siècle, compte tenu de l'intervalle de temps qui sépare deux états calculés, cela représente plus de 1,7 million d'étapes temporelles, pour lesquelles le modèle calcule toutes les variables physiques associées à chaque centaine de milliers de volumes de l'océan et de l'atmosphère. Ces simulations sont ensuite refaites à partir d'états initiaux légèrement différents, pour tenir compte des incertitudes sur la description du climat en 2005.

Découpage à géométrie variable. La finesse du découpage spatial est un compromis entre la fidélité de description des phénomènes et la puissance informatique disponible. Car quand on divise chaque dimension d'une boîte par deux (pour la longueur et la largeur), il faut aussi diviser par deux le pas de temps du calcul. La quantité de calculs est alors multipliée par huit !

Les scientifiques pratiquent donc un découpage à géométrie variable, en tenant compte de l'échelle des phénomènes physiques en jeu. Horizontalement, ils dessinent un maillage de l'atmosphère régulier en latitude, qui se traduit par des dimensions d'autant plus faibles qu'on s'éloigne de l'équateur. Aux latitudes européennes, la dimension horizontale du découpage est ainsi de 150 à 300 kilomètres suivant les modèles. Dans les océans, le maillage est affiné dans les régions tropicales pour mieux décrire les courants qui emportent la chaleur vers les plus hautes latitudes. Ainsi, dans le modèle de l'institut Pierre-Simon-Laplace, la maille océanique a une longueur nord-sud de 50 kilomètres à l'équateur, et de 200 kilomètres aux latitudes européennes.

© AHMEA, F. DURILLON POUR LE LSCE CEA/CNRS/UVSQ

Les modèles du climat découpent les océans et l'atmosphère en mailles tridimensionnelles, dont la taille varie selon leur position. Par exemple, les couches atmosphériques sont de plus en plus épaisses avec l'altitude.

L'essentiel

- **DEPUIS 2007, les modèles décrivent plus finement les océans, l'atmosphère et la banquise, en profitant de moyens de calculs accrus.**
- **POUR PRÉPARER LE NOUVEAU RAPPORT sur l'évolution du climat, les scientifiques ont introduit dans leurs modèles de nouveaux mécanismes, tels le cycle du carbone, l'évolution de la végétation, les aérosols non sulfatés et la chimie atmosphérique.**
- **LES MODÈLES s'appuient sur des hypothèses de principe pour les émissions de gaz à effet de serre, et non plus sur des scénarios socio-économiques.**

L'épaisseur des boîtes n'est pas non plus uniforme. Compte tenu de l'importance des échanges avec l'océan et les terres émergées, la couche d'air la plus proche de la surface n'a que quelques dizaines de mètres d'épaisseur. C'est là que se jouent des mécanismes complexes, comme le réchauffement du sol et la convection sous l'influence du relief, les échanges de chaleur avec les mers, l'absorption de dioxyde de carbone par l'océan et la végétation.

Puis, plus on s'éloigne du sol, plus l'épaisseur des boîtes augmente, jusqu'à atteindre 50 à 100 kilomètres pour le dernier niveau, situé dans la stratosphère*. *« Pour le précédent rapport du GIEC, en 2007, l'atmosphère était découpée dans notre modèle en 45 niveaux*, précise Serge Planton, responsable de l'unité de recherche sur le changement climatique à Météo France. *Cette fois, nous avons opté pour 31 niveaux, car les études ont montré qu'il valait mieux privilégier la réduction du maillage horizontal, et nos capacités de calcul ne sont pas extensibles à volonté. »*

Les dimensions retenues pour ce maillage de l'atmosphère et de l'océan ont aussi des conséquences sur la façon dont les géophysiciens intègrent dans leurs modèles les différents mécanismes impliqués dans le climat. Ils disposent en effet pour cela de deux méthodes. Quand les équations >>>

*LA STRATOSPHÈRE est la couche de l'atmosphère située approximativement entre 18 et 50 kilomètres d'altitude.

Des premiers résultats

Les premières simulations du CNRM-Cerfacs de Météo France et de l'institut Pierre-Simon-Laplace, qui développent les deux modèles climatiques français, ont été publiées. Le scénario le plus optimiste aboutit à un excédent de puissance absorbée lié à l'effet de serre de 3 watts par mètre carré en 2100. La hausse de température serait stabilisée à 2 °C par rapport à 1850. À l'opposé, le scénario qui conduit à un excédent de 8,5 watts par mètre carré conduirait à une hausse de 3,5 °C à 5 °C en 2100. Les deux modèles confirment une intensification du cycle hydrologique, avec des précipitations en augmentation dans les régions tropicales et aux plus hautes latitudes, et en baisse dans certaines zones subtropicales, ainsi qu'autour de la Méditerranée.

Une meilleure modélisation du climat

>>> physiques d'évolution des phénomènes sont applicables à l'échelle de maillage du modèle, elles y sont utilisées. C'est le cas des circulations atmosphérique et océanique, décrites par cinq équations intégrant la température, le vent ou le courant et la densité : deux équations de conservation, pour la masse et l'énergie ; trois autres pour les trois composantes de vitesse des particules fluides (air ou eau).

Quand, au contraire, l'échelle ne le permet pas, les géophysiciens procèdent à une « paramétrisation » : à partir d'observations et de modèles physiques, ils établissent un modèle simplifié qui « résume » le mécanisme. C'est le cas des nuages, qui ne peuvent être décrits individuellement avec un maillage de plusieurs dizaines de kilomètres. La paramétrisation permet ainsi de déterminer, pour chaque volume d'atmosphère, une approximation de sa distribution nuageuse.

« La formulation et l'évaluation de ces paramétrisations sont l'essentiel de notre travail, explique Jean-Louis Dufresne, qui dirige le pôle de modélisation à l'institut Pierre-Simon-Laplace. *C'est sur ce plan que les modèles diffèrent le plus. »* C'est par exemple le cas de la banquise. En juillet 2012, une équipe de l'université de Louvain, en Belgique, a relevé que, suivant les modèles, la banquise arctique disparaîtra presque totalement en été entre 2040 et 2100 [1]. Soit une dispersion sur soixante ans. *« La physique de la glace et ses interactions avec l'atmosphère et l'océan se jouent à très petite échelle, alors que la banquise est très étendue,* justifie Jean-Louis Dufresne. *Si on voulait décrire à la perfection ce qui se passe, il faudrait une puissance de calcul au moins 1 million de fois plus importante que celle dont nous disposons. »*

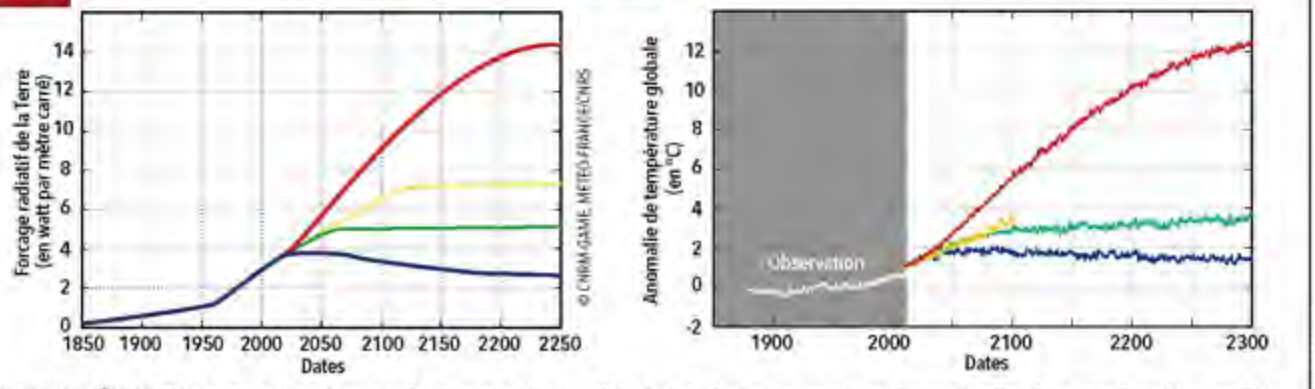
D'année en année, les campagnes d'observation permettent d'affiner ces paramétrisations. C'est par exemple le rôle de l'A-Train, groupe de cinq satellites lancés depuis 2002 par les États-Unis, la France et le Japon. Ils volent en formation groupée à 700 kilomètres d'altitude pour étudier, entre autres, les nuages d'eau ou de glace, et les aérosols de l'atmosphère.

Nouveaux mécanismes physiques. De cette façon, les climatologues introduisent de plus en plus de phénomènes physiques dans leurs modèles. Dans les années 1970, la climatologie ne connaissait que l'atmosphère, puis les terres émergées sont apparues. Au début des années 1990, on a commencé à représenter les océans et la banquise. Il y a dix ans, les géophysiciens ont introduit les aérosols sulfatés, émis par les combustibles fossiles et les volcans. C'est avec ces éléments qu'ont été réalisées les simulations sur lesquelles s'est fondé le rapport du GIEC de 2007.

Quelques modèles commençaient déjà à représenter d'autres aérosols, et le rôle de la végétation dans le cycle du carbone, mais ils n'étaient pas au point. *« Depuis, d'importants progrès ont été faits,* résume Chris Jones, de l'Office météorologique britannique. *Auparavant, nous augmentions la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone, sans tenir compte de la végétation. Désormais, nous avons défini cinq types de végétation, en fonction de leur importance dans le cycle du carbone, dont la proportion est déterminée selon la latitude. »*

Notre Terre apparaît désormais comme recouverte de végétation en certains endroits, avec des forêts qui croissent en captant du dioxyde de carbone dans certaines régions ou qui dispa-

Fig.1 Gaz à effet de serre et températures



LES MODÉLISATEURS travaillent à partir de quatre scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, représentés par quatre courbes de forçage radiatif par rapport à 1850 (à gauche). Ils ont calculé, pour chaque cas, les variations attendues de la température globale, par rapport à la moyenne des années 1901 à 2000 (à droite, avec le modèle de l'institut Pierre-Simon-Laplace).

raissent en libérant ce gaz. « *Nous avons aussi fait des progrès sur la chimie de l'atmosphère*, se félicite le Britannique. *Nous intégrons par exemple les suies, et de nombreux autres aérosols, ainsi que des mécanismes chimiques de formation et de destruction de molécules qui interagissent avec le climat.* »

Pour s'assurer de la validité de leurs modèles, les climatologues les utilisent afin de reproduire le climat observé depuis le milieu du XIX[e] siècle. En partant de l'état du climat en 1850, ils vérifient par exemple que la courbe d'évolution de température du globe est fidèlement représentée. Ils s'assurent aussi que les variations climatiques naturelles sont correctement décrites comme l'alternance El Niño/La Niña* de réchauffement et de refroidissement des eaux du Pacifique.

Cela permet de vérifier que l'introduction d'un nouveau mécanisme physique ne dégrade pas la qualité des simulations. « *C'est cet exercice sur le passé qui sert de juge de paix*, justifie Serge Planton. *On constate par exemple que l'introduction de nouveaux aérosols tend à dégrader la qualité des simulations du climat sur le XX[e] siècle. Mais cette représentation jouera probablement un rôle mineur dans la définition par le GIEC de la fourchette de projection de température pour le XXI[e] siècle.* »

Simulations sur 1500 ans. Les climatologues poussent aussi leurs outils à leurs limites, en conduisant des simulations à très long terme. Par exemple, pour vérifier que, à teneur en gaz à effet de serre et rayonnement solaire constants, un modèle ne fait pas apparaître de réchauffement (ou de refroidissement). « *Nous testons notre outil sur une échelle de 1500 ans, et nous constatons une excellente stabilité* », se félicite Jean-Louis Dufresne.

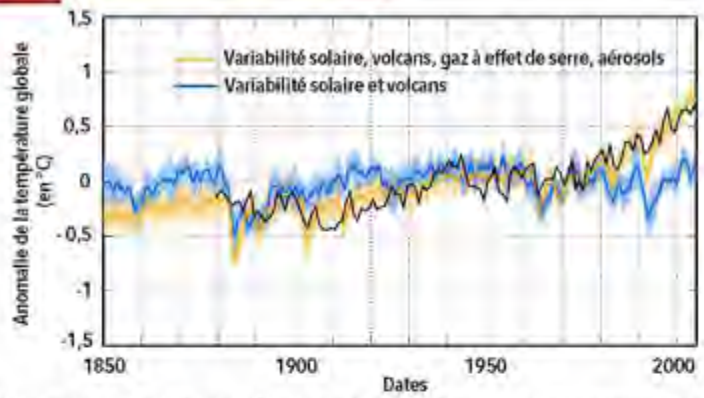
Comme Serge Planton et Chris Jones, le physicien estime que le niveau d'incertitude sur le réchauffement reste aujourd'hui équivalent à ce qu'il était en 2007. « *Nous avons ajouté de l'incertitude en introduisant de nouveaux mécanismes, mais dans le même temps celle sur les autres a été réduite, c'est par exemple le cas de la banquise.* »

Enfin, une autre nouveauté a été introduite dans la méthode de production des résultats qui serviront de point de départ au prochain rapport du GIEC. Jusqu'à présent, un groupe de chercheurs commençait par définir des scénarios socio-économiques, à partir d'hypothèses de démographie, de consommation de combustibles fossiles, de progrès technologique, etc. Ensuite, seulement, les climatologues appliquaient leurs modèles à ces scénarios. Pour gagner du temps, les deux volets – simulation et évaluation des émissions futures – sont désormais conduits en parallèle. Les climatologues se sont donc mis d'accord sur quatre courbes d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre, qui aboutissent à quatre valeurs de forçage radiatif de la Terre en 2100. Ce paramètre mesure le surcroît, par rapport à l'époque préindustrielle, de puissance du rayonnement solaire piégée dans l'atmosphère. Le forçage radiatif* était voisin de 2,5 watts par mètre carré en l'an 2000. Le scénario le plus optimiste conduit à 3 watts par mètre carré en 2100. Cela suppose que les émissions de gaz à effet de serre baissent dès 2020 et deviennent négatives – on nettoie l'atmosphère ! – à partir de 2070. On reviendrait à une concentration atmosphérique en gaz à effet de serre proche de ce qu'elle était en 2010.

Le scénario le plus pessimiste prévoit que ces émissions ne se stabiliseront qu'après 2100, avec un forçage de 8,5 watts par mètre carré en 2100. Deux autres scénarios conduisent à un forçage d'environ 4,5 watts par mètre carré et 6 watts par mètre carré à la même date. On disposera ainsi d'une fourchette de projections qui encadreront les trajectoires possibles d'évolution de nos émissions de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, une vingtaine de groupes scientifiques dans le monde développent et utilisent une soixantaine de modèles climatiques (et leurs déclinaisons). « *Cette diversité est un outil de progrès*, estime Jean-Louis Dufresne. *Elle permet d'améliorer les modèles pour l'avenir et de renforcer la confiance qu'on a dans l'intervalle de température qui sera annoncée l'an prochain par le GIEC.* » Pour l'instant, les analyses s'affinent, alors que la rédaction du rapport est bien entamée. Mais il ne devrait pas y avoir de surprise, à en croire les premiers résultats qui sortent des supercalculateurs : la Terre a bien la fièvre. ■

Fig.2 Retrouver le passé



L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE GLOBALE depuis 1850 (par rapport à la moyenne de la période 1901-2000) est calculée à partir des mesures (en noir). Pour éprouver la fiabilité du modèle du CNRM-Cerfacs, celui-ci a été utilisé pour simuler ces variations en ne tenant compte que des phénomènes naturels, variabilité solaire et volcans (en bleu), et en ajoutant les effets des gaz à effet de serre et des aérosols émis par les activités humaines (en orange).

© IGCE/IPSL/CEA/CNRS/UVSQ

* **LE PHÉNOMÈNE EL NIÑO/LA NIÑA** correspond à un réchauffement, ou au contraire à un refroidissement, des eaux de surface dans le Pacifique, près des côtes de l'Amérique du Sud.

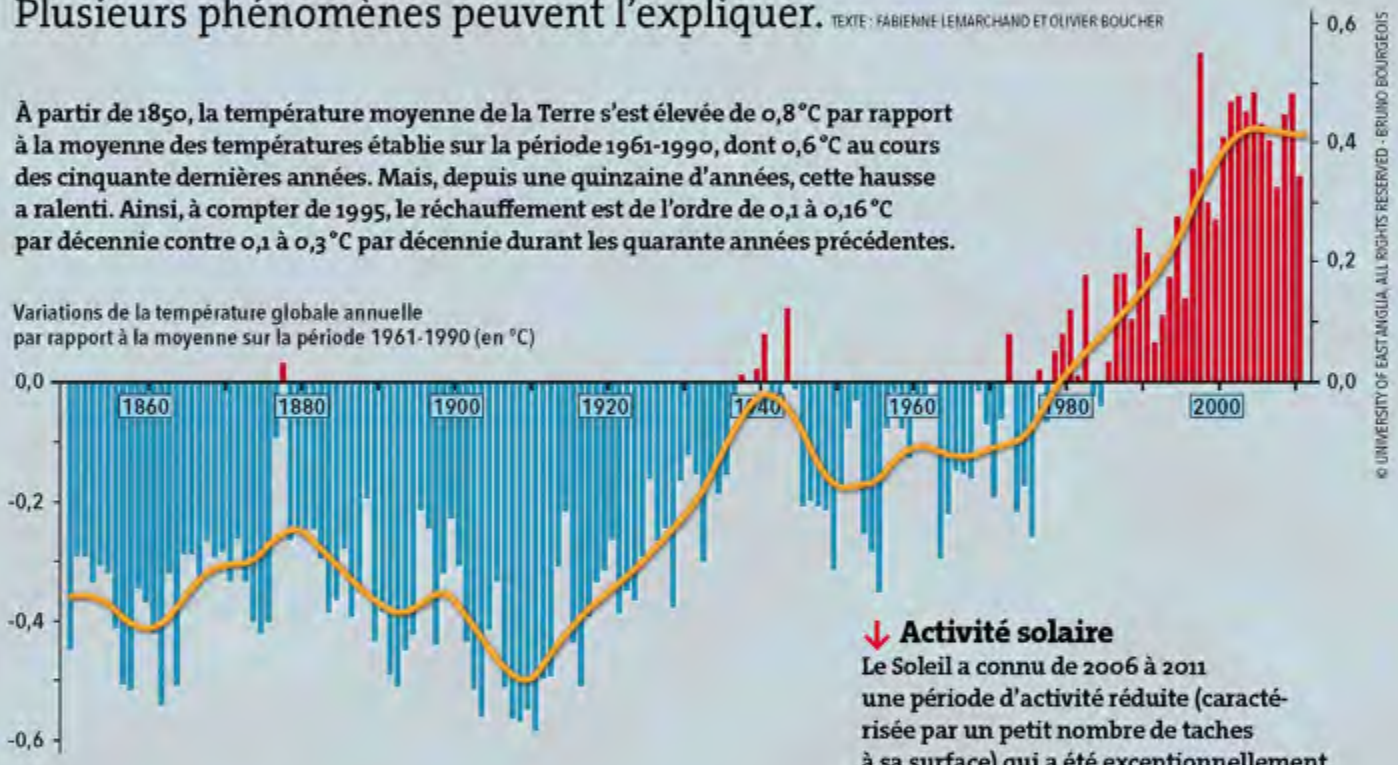
* **LE FORÇAGE RADIATIF** correspond à une variation de l'énergie absorbée par le système Terre-atmosphère.

[1] R. Mass *et al.*, *Nature*, 463, 747, 2011.

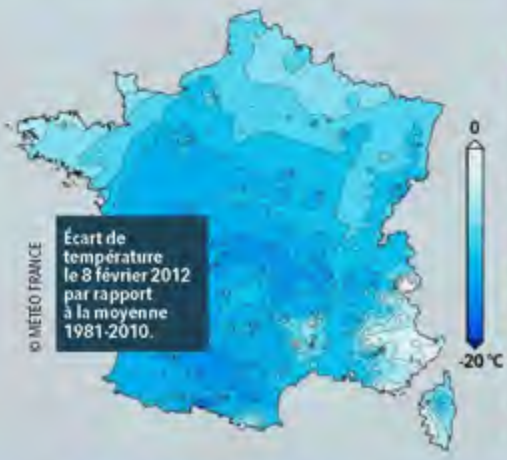
3 • Répit pour la température globale

La Terre n'a jamais été aussi chaude depuis 1850. Mais, ces dix dernières années, son réchauffement a ralenti. Plusieurs phénomènes peuvent l'expliquer. TEXTE : FABIENNE LEMARCHAND ET OLIVIER BOUCHER

À partir de 1850, la température moyenne de la Terre s'est élevée de 0,8 °C par rapport à la moyenne des températures établie sur la période 1961-1990, dont 0,6 °C au cours des cinquante dernières années. Mais, depuis une quinzaine d'années, cette hausse a ralenti. Ainsi, à compter de 1995, le réchauffement est de l'ordre de 0,1 à 0,16 °C par décennie contre 0,1 à 0,3 °C par décennie durant les quarante années précédentes.



Les causes possibles

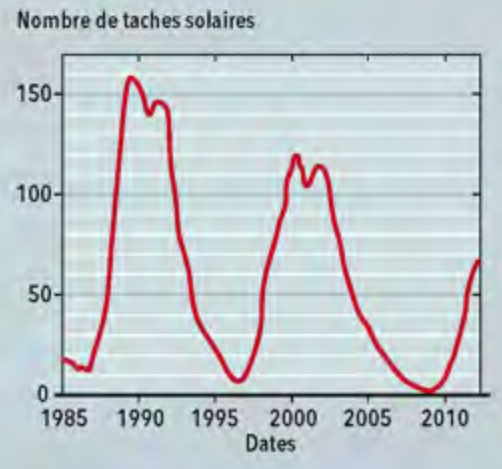


← Variabilité naturelle

Le réchauffement climatique n'est pas un phénomène régulier. Archives climatiques et simulations numériques montrent que des événements exceptionnels, telle la vague de froid très prononcée en Europe en février 2012 (à gauche), continuent à se produire, brouillant le calcul de la température moyenne annuelle.

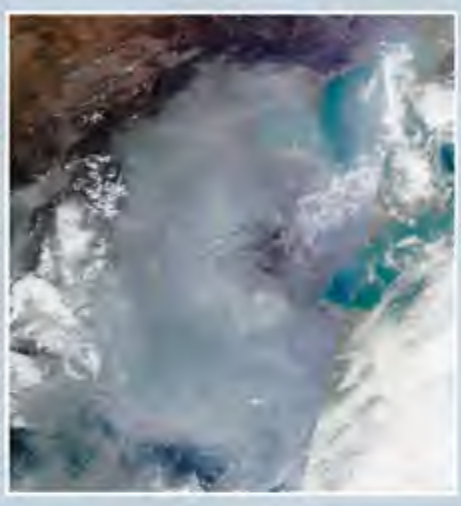
↓ Activité solaire

Le Soleil a connu de 2006 à 2011 une période d'activité réduite (caractérisée par un petit nombre de taches à sa surface) qui a été exceptionnellement longue. Après une reprise fin 2011, cette activité semble de nouveau diminuer, ce qui laisse augurer un nouveau cycle de faible amplitude.



Éruptions volcaniques →

Ces dernières années, des éruptions volcaniques (dont celle du Merapi, en Indonésie, en octobre 2010, ci-contre) ont propulsé assez de cendres et d'aérosols dans la stratosphère pour baisser la température de la Terre de quelques centièmes de degré pendant un ou deux ans.



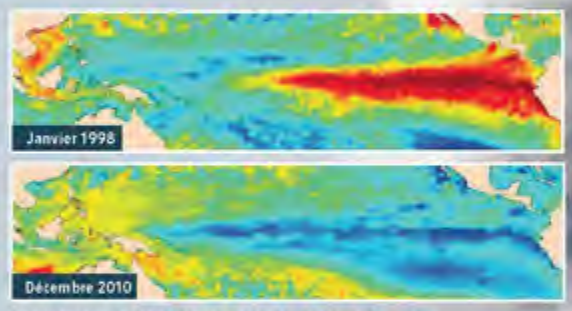
© NASA/LANCE/EODIS MODIS RAPID RESPONSE TEAM AT NASA GSFC

← Pollution asiatique

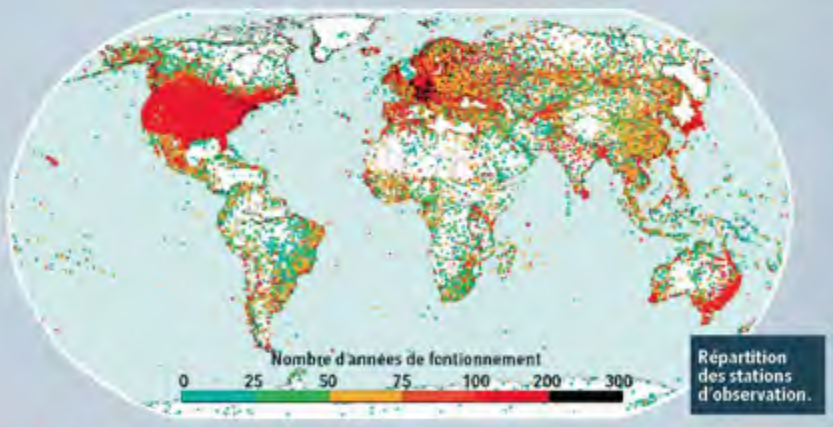
Les émissions de particules continuent d'augmenter dans les pays asiatiques (Chine et Inde), notamment en raison de la multiplication des centrales à charbon. Ces composés forment un nuage (ci-contre) qui diffuse et absorbe le rayonnement solaire, contribuant ainsi à réduire l'énergie solaire, qui parvient à la surface de la Terre, et l'augmentation de la température.

El Niño →

Ce grand courant marin chaud (en rouge, sur l'image du haut) qui traverse tous les deux à sept ans le Pacifique entraîne une hausse des températures planétaires. L'année 1998, la plus chaude depuis 1850, coïncide ainsi avec un événement El Niño particulièrement intense. Or aucun événement de cette ampleur ne s'est produit depuis lors.



EL NIÑO : © 1997-2012 CNES, CLS, AVISO (TOUS DROITS RÉSERVÉS)



↑ Biais d'échantillonnage

Pour calculer la température moyenne de la Terre, les scientifiques utilisent les mesures réalisées par des stations installées sur les continents et les océans. Ces données sont homogénéisées et corrigées pour éliminer les séries de mesures incomplètes, et pour tenir compte de l'évolution des instruments et de l'environnement immédiat de ces stations. Des extrapolations sont aussi réalisées pour évaluer les températures des zones mal couvertes. Cela conduit à sous-estimer le fait que certaines d'entre elles, l'Arctique et l'Antarctique, se sont réchauffées plus vite que la moyenne ces dernières années.

© NOAA NCDC AND NASA GISS

© BAY ISMOYO/AFP

4 • Quelles émissions de gaz à effet de serre faut-il réduire ?

Le dioxyde de carbone est à long terme le gaz le plus important pour le réchauffement climatique. Mais, dans l'immédiat, agir sur les émissions de méthane est tout aussi nécessaire.

PAR **Benjamin Dessus,** ingénieur et économiste. Il préside l'association Global Chance,

AVEC **Bernard Laponche,** expert en politiques énergétiques,

ET **Hervé Le Treut,** qui dirige l'institut Pierre-Simon-Laplace en Île-de-France. Il est membre de l'Académie des sciences.

*LE PERMAFROST est le sous-sol gelé en permanence, aux hautes latitudes ou en altitude.

En dépit de la crise économique mondiale, les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par les activités humaines ne cessent d'augmenter. Tous les experts s'accordent à considérer que l'accumulation de dioxyde de carbone est la principale cause de réchauffement du climat de la planète. L'effort de réduction de ses émissions est primordial, mais ce n'est pas le seul gaz en cause.

En 2008, déjà, nous insistions sur la nécessité de réduire à court terme les émissions de méthane [1]. Ce gaz à effet de serre est en effet en deuxième position pour l'importance de ses impacts parmi ceux émis par l'homme. Ce sujet reste d'actualité, car les émissions de méthane, qui semblaient se stabiliser au début des années 2000, sont reparties à la hausse.

Émissions artificielles et naturelles. En outre, la généralisation de l'exploitation des gaz non conventionnels* est potentiellement porteuse d'une importante augmentation supplémentaire des émissions de méthane. On peut d'autant plus le redouter que de récentes études, comme celle menée au Colorado par Gabrielle Petron, de l'Administration américaine pour l'océan et l'atmosphère, et ses collègues, semblent montrer que l'exploitation des gaz de schiste entraîne des fuites unitaires de méthane plus importantes que celle du gaz naturel conventionnel [2]. Par ailleurs, d'autres travaux comme ceux d'Edward Schuur, de l'université de Floride, et Benjamin Abbott, de l'université d'Alaska, indiquent qu'il faut prendre au sérieux l'hypothèse d'un dégagement non négligeable de méthane par les océans et le permafrost* au fur et à mesure que ceux-ci se réchauffent [3].

Depuis la négociation qui a abouti au protocole de Kyoto, en 1997, le choix a été fait, au niveau international, d'intégrer les mesures concernant ces différents gaz dans une « comptabilité carbone » unique. Par souci de simplicité, toutes les émissions de gaz à effet de serre sont ramenées à des « équivalents carbone », exprimés en quantité de dioxyde de carbone. Ce choix présente l'inconvénient de mettre en scène une compétition entre les actions de réduction de dioxyde de carbone et de méthane. Ces arguments militent pour une approche attentive de l'action consacrée à ce dernier.

Comment déterminer en effet les mesures les plus efficaces de réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Les gaz concernés diffèrent par leur durée de résidence dans l'atmosphère : de

L'essentiel

> LES RÉDUCTIONS D'ÉMISSIONS par l'homme de gaz à effet de serre font l'objet d'une comptabilité unique en « équivalent dioxyde de carbone ».

> CE SYSTÈME CONDUIT À SOUS-ESTIMER l'impact à court et moyen terme des réductions d'émissions de méthane.

> POUR ÉVITER QUE LE RÉCHAUFFEMENT ne s'emballe dans les prochaines décennies, il faut porter une attention spécifique aux émissions de méthane.

Cette vache, en Argentine, fait l'objet d'une expérimentation destinée à réduire les rejets de méthane par ces animaux. Le cheptel de ce pays serait responsable d'environ 0,6 % des émissions mondiales de ce gaz.

© MARTIN ACOSTA/ARCHIVOLATINO/EFE

l'ordre du siècle pour le dioxyde de carbone et l'oxyde nitreux, plus pour certains fréons* ; une décennie pour le méthane ; quelques semaines pour les polluants ayant une chimie très active. En outre, leur capacité à absorber, sous forme de chaleur, l'énergie apportée par le rayonnement solaire, leur « forçage radiatif* », varie beaucoup.

21 tonnes. Pour faciliter les comparaisons, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a défini le « pouvoir de réchauffement global ». Il représente l'impact sur le climat, à un horizon défini, de l'émission d'une certaine masse d'un gaz donné par comparaison à l'émission simultanée d'une même masse de dioxyde de carbone. Ainsi, le forçage radiatif du méthane est environ cent fois celui du dioxyde de carbone, mais ce gaz disparaît plus rapidement de l'atmosphère. La valeur du pouvoir de réchauffement global du méthane retenue dans le protocole de Kyoto, calculée pour un effet à cent ans, est 21. L'émission ponctuelle d'une tonne de méthane est donc comptabilisée dans toutes les actions comme équivalente à celle de 21 tonnes de dioxyde de carbone.

La définition du pouvoir de réchauffement global est donc un choix, et un débat scientifique a été ouvert sur la pertinence et les limites de ce choix. La durée choisie pour évaluer l'impact des mesures prises renvoie à une évaluation des risques climatiques. On considère le plus souvent que les risques les plus importants >>>

* **LES FRÉONS** sont des gaz chlorofluorocarbonés, autrefois utilisés dans les systèmes de réfrigération ou dans les atomiseurs.

* **LE FORÇAGE RADIATIF** d'un gaz mesure sa capacité instantanée à se réchauffer sous l'effet du rayonnement solaire et de la réémission de rayonnement par la Terre.

* **LES GAZ NON CONVENTIONNELS,** piégés dans des roches argileuses profondes peu perméables, sont plus difficiles d'accès que les gaz conventionnels.

Les indicateurs

Comment comparer l'impact de mesures de réduction des émissions de différents gaz à effet de serre, en l'occurrence du méthane et du dioxyde de carbone ? Plusieurs indicateurs ont été définis, prenant en compte différents aspects de la mise en œuvre de ces mesures.

• Le pouvoir de réchauffement global du méthane à l'horizon de temps T (en années), est le rapport des forçages radiatifs* d'une tonne de méthane et d'une tonne de dioxyde de carbone, multiplié par un facteur de correction prenant en compte la transformation du méthane en d'autres gaz à effet de serre, multiplié par le rapport des valeurs intégrées sur la période 0-T des concentrations respectives de méthane et de dioxyde de carbone résultant des émissions ponctuelles initiales.

• Le pouvoir de température globale du méthane à l'année T est le rapport des forçages radiatifs du méthane et du dioxyde de carbone pour les concentrations de ces gaz résultant d'une émission ponctuelle d'une tonne l'année 0.

• Le pouvoir de réchauffement global d'émissions pérennes de méthane à l'horizon T est le rapport de l'effet intégré de réchauffement sur la période 0-T d'émissions (ou de réductions) annuelles durant la période T d'une tonne de méthane et d'une tonne de dioxyde de carbone.

• Le pouvoir de température globale d'émissions pérennes du méthane est égal au rapport des forçages radiatifs d'une tonne de méthane et d'une tonne de dioxyde de carbone multiplié par le rapport des concentrations engendrées pour chacun des deux gaz par leur émission annuelle constante sur la période 0-T.

• Le pouvoir de réchauffement global programme du méthane à l'horizon T est le rapport des forçages radiatifs d'une tonne de méthane et d'une tonne de dioxyde de carbone, multiplié par le rapport des concentrations de chacun des gaz à l'année T résultant du programme annuel mis en place pendant les *n* années de ce programme.

• Le pouvoir de température globale programme à l'horizon T est le rapport des forçages radiatifs des deux gaz pondéré par le rapport de leurs concentrations résultant d'un programme de réduction annuel sur toute la durée de celui-ci.

Quelles émissions de gaz à effet de serre faut-il réduire ?

>>> sont ceux qui affectent les composantes lentes du système climatique, dont l'évolution est irréversible. Cela conduit à donner plus de poids aux actions qui auront un impact fort en fin de siècle.

La durée de cent ans choisie au niveau international fait légitimement référence à des menaces majeures qui s'exprimeront fortement à cet horizon : fonte des glaciers, relèvement du niveau de la mer, modification du couvert végétal. Dans ce cadre, une émission ponctuelle de méthane, à fort effet de serre mais peu durable dans l'atmosphère, n'a pas une grande importance. En revanche, s'il s'agit d'éviter un réchauffement à relativement court terme, son pouvoir de réchauffement global augmente significativement, et il devient indispensable de s'en préoccuper.

Réchauffement transitoire risqué. De fait, on connaît mal le risque qu'il y aurait à dépasser bien avant la fin du siècle, même transitoirement, le seuil de réchauffement de 2°C, choisi comme référence en 2009 lors de la conférence de Copenhague sur le climat. Comment réagirait par exemple la végétation, qui peut être fortement affectée par quelques épisodes de chaleur seulement ? L'accélération des émissions donne de ce point de vue une importance nécessairement plus grande aux prochaines décennies.

Le potentiel de réchauffement global (et la définition de l'équivalent carbone qui en découle) ne constitue donc qu'un indice, sans valeur universelle. Selon les paramètres climatiques considérés, il peut en effet apparaître comme trop élevé ou trop faible pour rendre compte des effets du méthane. Ainsi, la température moyenne de la surface de la planète à un instant donné dépend pour l'essentiel (mais pas seulement, en particulier du fait de l'inertie thermique des océans) de la concentration atmosphérique instantanée de l'ensemble des gaz à effet de serre, dont le méthane [4]. Comme la concentration engendrée par une émission ponctuelle de méthane décroît rapidement avec le temps, l'intégration dans le temps comprise dans le pouvoir de réchauffement global donne une représentation amplifiée de l'impact de ce gaz.

En d'autres termes, la température dans cent ans dépendra peu du méthane émis aujourd'hui. C'est la raison pour laquelle Keith Shine, de l'université de Reading, au Royaume-Uni, et ses collègues ont proposé le recours à un nouvel indicateur, mieux adapté à cette évaluation : le potentiel de température globale [5].

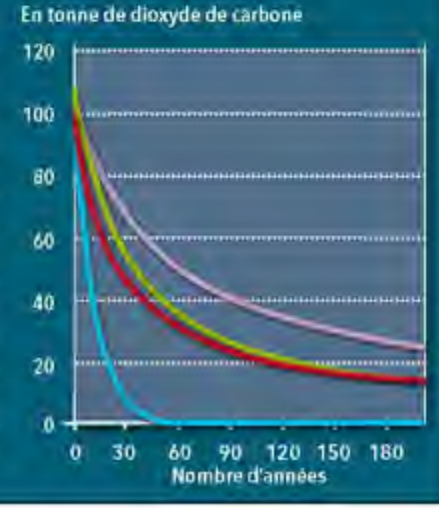
Au contraire, d'autres paramètres, qui conditionnent l'irréversibilité des changements climatiques, par exemple la température des couches intermédiaires ou profondes des océans, qui détermine leur dilatation, ou la fonte des grands glaciers, dépendent davantage de l'intégration du forçage radiatif sur cette même période. Dans ce cas, l'impact des émissions de méthane est minoré par le pouvoir de réchauffement global dans sa définition actuelle, chaque fois que l'on considère des échéances inférieures à cent ans.

Réductions durables. Mais il existe une autre limitation à l'usage de ces indicateurs qui ne nous semble pas avoir fait l'objet d'une attention suffisante. Elle tient à la pérennité des mesures de réduction d'émissions de gaz à effet de serre mises en place. Si l'on évalue l'opportunité d'une action, on doit bien sûr considérer son impact pendant toute la durée où elle porte des conséquences. Or, le pouvoir de réchauffement global (comme le pouvoir de température globale) évalue l'impact d'une action ponctuelle : l'émission d'une quantité de gaz à un instant donné (ou la suppression de cette émission).

En fait, ces actions de réduction d'émissions peuvent le plus souvent être considérées comme pérennes : il s'agit en effet de supprimer de manière définitive une source d'émission (par exemple, une décharge d'ordures à l'air libre) ; ou bien ces mesures s'appuient sur des projets qui ont des durées de vie de plusieurs décennies ; enfin, dans certains cas parce que les instances de décision relative à

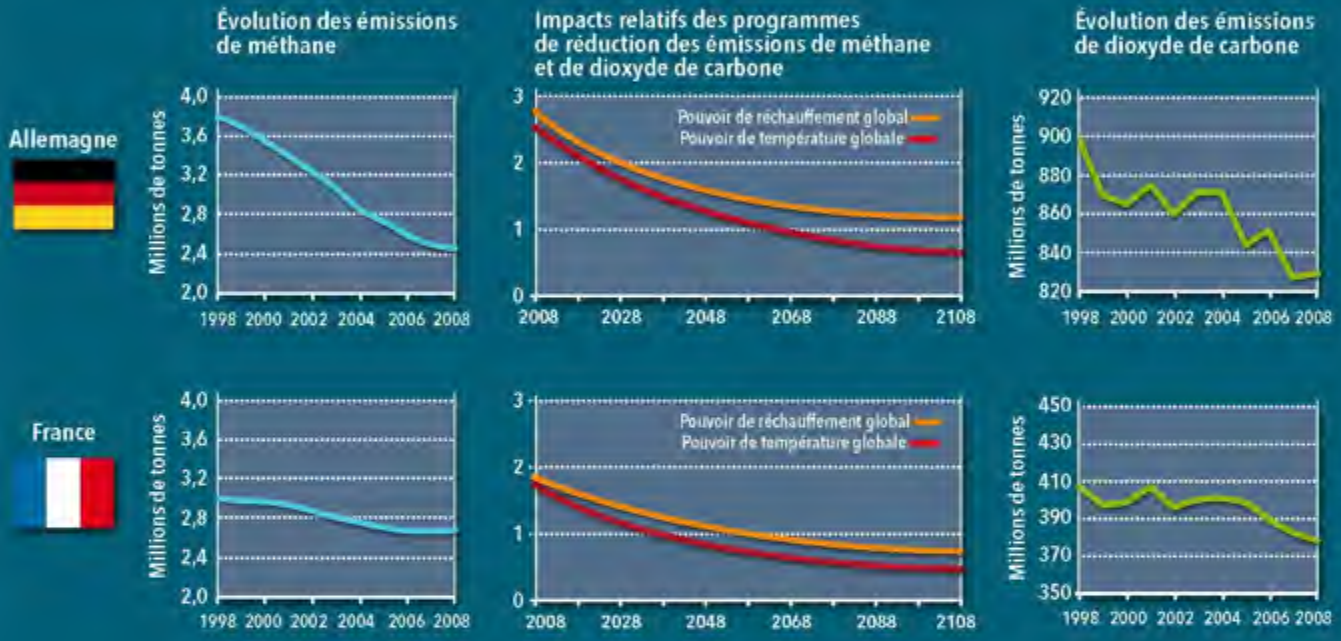
Fig.1 Indicateurs et durée

LE POUVOIR DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL et le pouvoir de température globale du méthane rapportés à un programme décennal de réductions pérennes des émissions (respectivement en rose et en vert) décroissent beaucoup moins vite au cours du temps que dans la définition du GIEC, qui considère des réductions d'émissions ponctuelles (en rouge et en bleu). L'impact réel de tels programmes est donc systématiquement sous-évalué.



Les programmes de réduction en France et en Allemagne

On compare les impacts des programmes de réduction d'émissions de méthane et de dioxyde de carbone en Allemagne et en France entre 1998 et 2008 en calculant les évolutions relatives du pouvoir de température globale (en rouge) et du pouvoir de réchauffement global (en orange) du premier par rapport au second. Les réductions d'émissions de méthane portent sur des quantités environ 60 fois plus faibles que celles de dioxyde de carbone. Toutefois, elles restent longtemps plus efficaces. Leur impact en terme de température est en effet supérieur jusqu'en 2064 en Allemagne et jusqu'en 2034 en France. Au bout de cent ans, les conséquences des mesures concernant le méthane comptent encore pour 66 % de celles prises sur le dioxyde de carbone en Allemagne et 44 % en France. En terme de réchauffement, il faut attendre 2125 en Allemagne et 2065 en France pour que les mesures sur les deux gaz aient des impacts équivalents.



ces projets considéreront de manière naturelle qu'en fin de durée de vie les dispositifs mis en place seront renouvelés par d'autres au moins aussi efficaces.

Pour évaluer l'impact de cette pérennité des actions, nous avons défini deux nouveaux indicateurs : le pouvoir de réchauffement global d'émissions pérennes, et le pouvoir de température globale d'émissions pérennes [6]. Ils sont calculés comme les précédents, mais en considérant que, chaque année on supprime l'émission d'une tonne de gaz. Ces indicateurs décroissent nettement moins vite avec l'augmentation de l'horizon temporel que les deux précédents. L'impact des mesures de réduction des émissions de méthane est ainsi évalué à des niveaux supérieurs.

On peut encore aller plus loin : les programmes de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont souvent construits sous la forme d'un ensemble d'actions pérennes progressives, engagées année après année, pour obtenir à un horizon donné l'élimination permanente d'une part des émissions de l'année initiale. Cela se prête à une mise en forme mathématique simple : pour chacun des programmes à comparer, on considère que l'on met en œuvre une nouvelle action pérenne de réduction d'une quantité fixée de chacun des gaz considérés, chaque année, de l'année zéro à l'année de fin du programme. On peut alors définir des pouvoirs de réchauffement globale et de pouvoir de température global mesurant l'impact de ces programmes de réduction [fig. 1]

L'exemple des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'Allemagne et de la France entre 1998 et 2008 montre l'importance de cette notion de programme >>>

Quelles émissions de gaz à effet de serre faut-il réduire ?

>>> (lire « Les programmes de réduction en France et en Allemagne », p. 49). Les programmes de réduction des émissions de méthane, rarement mis en avant et préconisés, ont, dans cet exemple, un impact significatif à l'échelle du siècle.

Cette conclusion est confirmée par plusieurs études récentes. Ainsi, Drew Shindell, de la NASA, et ses collègues ont montré qu'une réduction de l'ordre de 30 % des émissions mondiales de méthane en 2030, objectif considéré comme vraisemblable dans de bonnes conditions économiques, permettrait de diminuer de 0,2 à 0,4 °C la hausse de la température moyenne mondiale d'ici à 2050. Cette réduction apporterait en outre des bénéfices en termes de production agricole [7].

Le Programme des Nations unies pour l'environnement a fourni des indications du même ordre en 2011, dans un rapport à la conférence de Durban [8]. Toutes ces études évitent le recours au pouvoir de réchauffement global ou au pouvoir de température globale selon les définitions du GIEC, puisqu'elles se fondent sur l'analyse de l'évolution des concentrations des différents gaz à effet de serre associées à des programmes pérennes de réduction des émissions entre 2010 et 2030.

Le choix d'un indice permettant de comparer le rôle des différents gaz dépend donc avant tout des objectifs que l'on donne aux outils économiques de réduction des émissions. La nécessité d'un diagnostic commun aux différents gaz provient du recours à une « économie du carbone » globalisée – et le choix de plus ou moins favoriser une action de réduction des émissions d'un gaz ou d'un autre se fait par rapport aux instruments financiers développés dans ce cadre. Mais souvent, il n'y a pas de réelle compétition entre les mesures à prendre : beaucoup d'acteurs, d'entreprises ou de nations se trouvent en situation de réduire soit des émissions de méthane, soit des émissions de dioxyde de carbone. Il s'agit donc pour eux, pris individuellement, d'agir ou pas, et non de choisir entre deux actions.

Avantages multiples. Dans la pratique, les politiques à mettre en place s'inscrivent dans un faisceau de réalités et d'objectifs multicritères locaux ou régionaux. Ainsi, dans de nombreuses régions manquant cruellement de ressources locales d'énergie, la valorisation sous forme de méthane des résidus urbains et agricoles peut être, avec des considérations sanitaires, l'élément déterminant d'une politique de réduction des émissions de méthane. En Chine par exemple, la récupération du méthane (le grisou) qui s'échappe des mines de charbon, répond d'abord à un objectif de valorisation énergétique. Par ailleurs, la modération du recours à l'alimentation carnée, en particulier bovine, surtout justifiée par des considérations sanitaires, pourrait aussi avoir une influence non négligeable.

Au-delà d'une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre orientée vers la préservation à long terme des grands équilibres naturels, qui est primordiale, il est nécessaire de gérer au mieux l'évolution du système climatique durant les prochaines décennies. Cela réclame une attention spécifique, au-delà de ce que permettra un appui exclusif sur les indicateurs actuels et les marchés carbone qui en découlent – et donc un appui incitatif pour des mesures ciblées. ■

[1] B. Dessus, B. Laponche et H. Le Treut, « Effet de serre, n'oublions pas le méthane », *La Recherche*, mars 2008, p. 47.
[2] G. Petron *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, 117, D04304, 2012.
[3] E.A.G Schuur et B. Abbott, *Nature*, 480, 32, 2011.
[4] O. Boucher, *La Météorologie*, 68, 35, 2010.
[5] K.P. Shine *et al.*, *Climatic Change*, 68, 281, 2005.
[6] B. Dessus *et al.*, http://bit.ly/GlobalChance283, 2012.
[7] D. Shindell *et al.*, *Science*, 335, 183, 2012.
[8] www.unep.org/dewall/portals/67/pdf/BlackCarbon_SDM.pdf.

Pour en savoir plus

Livres

> Didier Hauglustaine, Jean Jouzel et Valérie Masson-Delmotte, *Atmosphère, atmosphère*, Le Pommier, 2008.

> Peter Newell et Matthew Paterson, *Climat et capitalisme, réchauffement climatique et transformation de l'économie mondiale*, De Boeck, 2011.

> Didier Hauglustaine, Jean Jouzel et Hervé Le Treut, *Climat : chronique d'un bouleversement annoncé*, Le Pommier, 2008.

> Valérie Masson-Delmotte, *Climat, le vrai et le faux*, Le Pommier, 2011.

> Collectif, *Climat, une planète et des hommes*, Le Cherche-Midi, 2011

> Collectif, *Le Climat à découvert*, CNRS Éditions, 2011.

> John Houghton, *Le Réchauffement climatique, un état des lieux complet*, De Boeck, 2011.

> Association Négawatt, *Manifeste Négawatt, réussir la transition énergétique*, Actes Sud, 2012.

La Recherche a publié

> « Le risque climatique », *Les Dossiers de La Recherche*, n° 17, novembre 2004.

> « Le défi climatique », *Les Dossiers de La Recherche*, n° 31, mai 2008.

> Dossier « Climat, ce qui va changer », juillet 2006, p. 30.

> Dossier « Les trois inconnues du climat », décembre 2007, p. 30.

> Dossier « Réchauffement le rôle du Soleil », décembre 2008, p. 30

Web

> **climat.meteofrance.com** Météo France Climat.

> **www.ipcc.ch** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

> **www.ipsl.fr** Institut Pierre-Simon-Laplace.

> **climate.nasa.gov** Le site de la NASA dédié au changement climatique.

> **www.metoffice.gov.uk/climate-change** L'institut météorologique britannique.

> **www.un.org/fr/climatechange** Le portail des Nations unies concernant le changement climatique.

l'Etudiant

Conférence des présidents d'université

Sous le patronage de

Vous êtes étudiant, jeune diplômé de bac + 2 à bac + 5...

SALON MASTERS, MASTÈRES & MBA

8 et 9 février PARIS

Paris expo Porte de Versailles
Pavillon 5.1 • 10 h - 18 h

CARRIÈRES JEUNES DIPLÔMÉS

- Rencontrez les entreprises qui recrutent.
- Participez aux ateliers d'aide à la recherche d'emploi.
- N'oubliez pas votre CV !

L'Expansion · L'ENTREPRISE · L'EXPRESS · ANOUS PARIS · Le moniteur du commerce international · Direct Matin · viadeo · PARISJOB · NRJ PARIS 100,5

Gagnez du temps : invitations gratuites sur letudiant.fr

Une nouvelle génération de cellules photovoltaïques

Une moindre consommation de matières premières et de meilleurs rendements : c'est la promesse offerte par les premières cellules photovoltaïques combinant les technologies de miniaturisation et de concentration lumineuse.

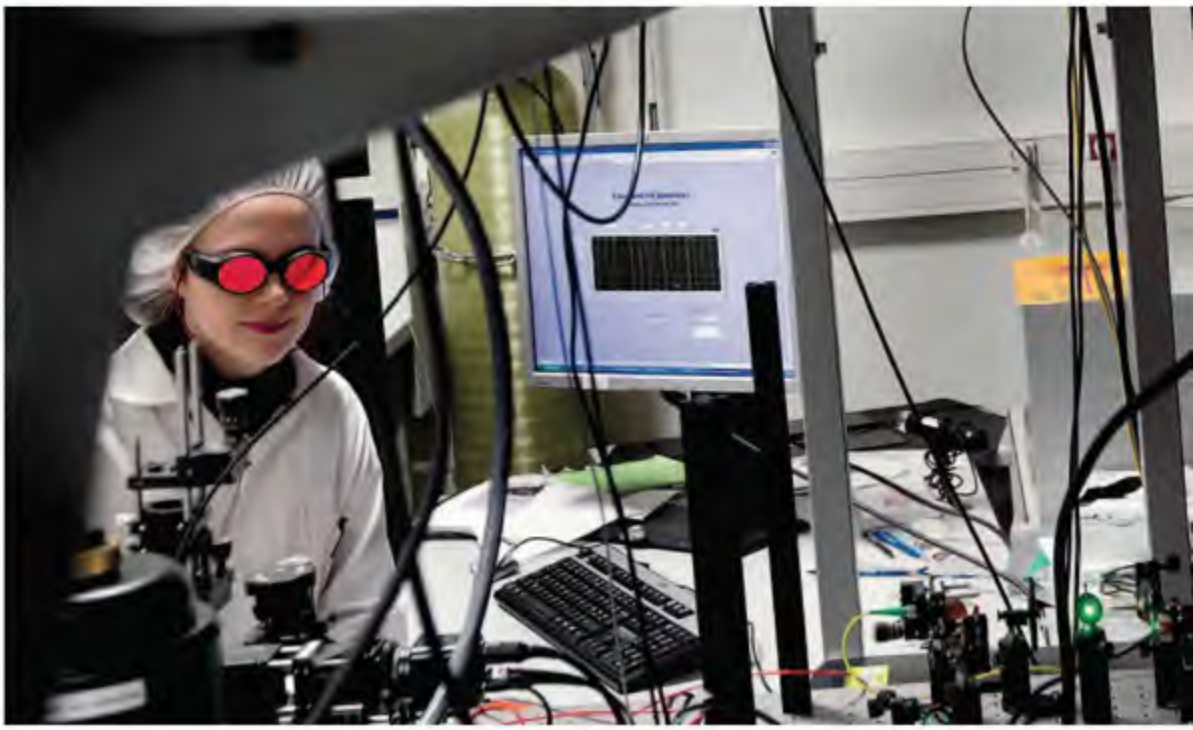
PAR **Myriam Paire,**

Jean-François Guillemoles

ET **Daniel Lincot,**
de l'Institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (Irdep), unité mixte de recherche CNRS-EDF-Chimie Paris Tech.

C'est l'une des sources d'énergie les plus prometteuses pour l'avenir. Confidentiel sur le marché de la production électrique il y a encore cinq ans, le photovoltaïque a, depuis, connu un développement continu en France. D'après les derniers chiffres, publiés en mai 2012 par ERDF, notre pays a déjà installé pour 3 gigawatts (GW) de panneaux solaires. L'objectif fixé lors du Grenelle de l'environnement en 2007 – 5,4 GW en 2020 – sera, selon toute vraisemblance, largement dépassé.

Malgré cela, la vitesse de développement du photovoltaïque va dépendre des performances de la filière. Comment faire, donc, pour améliorer sa compétitivité ? Deux options sont envisagées.



Premièrement : réduire la consommation de matériaux utilisés pour fabriquer les panneaux. Deuxièmement : augmenter les rendements, c'est-à-dire la proportion de lumière solaire que l'on réussit à convertir en électricité pour une surface de panneau donné.

En parallèle du développement industriel, de nombreuses équipes de recherche sont ainsi en quête de « ruptures technologiques ». Notre groupe développe, depuis 2009, une approche unique au monde. Elle vise à réduire la consommation de matériaux, tout en augmentant leurs rendements, grâce à la technique de concentration de la lumière [1].

La plupart des cellules photovoltaïques sont constituées d'un empilement de matériaux dits semi-conducteurs. Dans les semi-conducteurs, les photons peuvent communiquer directement leur énergie aux électrons. Des électrodes, placées sur les deux couches de semi-conducteurs, collectent ensuite les électrons, qui fournissent un travail au circuit extérieur, avant de revenir dans la cellule photovoltaïque à leur énergie initiale. La conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique se fait sans intermédiaire : c'est l'effet photovoltaïque. Lorsque l'on connecte cette cellule, un courant et une tension apparaissent à ses bornes. La cellule photovoltaïque fonctionne donc comme une pile (on parle d'ailleurs souvent de photopile solaire) [fig. 1].

Pertes d'énergie. Comme tout dispositif de ce genre, une cellule solaire est par ailleurs soumise à quatre types de pertes : toute l'énergie lumineuse n'est pas convertie en énergie électrique. Les premières pertes se produisent avant l'entrée de la lumière dans la cellule. En effet, certains photons sont réfléchis par la surface. Deuxième type de pertes : quand les photons pénètrent dans la cellule, certains n'arrivent pas à communiquer leur énergie aux électrons. Troisième source de perte, certains électrons n'ont pas assez d'énergie pour parvenir au circuit extérieur, ils dissipent alors cette énergie sous forme de chaleur, par un phénomène dit de « recombinaison ».

Enfin, dernier type de pertes, les pertes résistives : le courant électrique qui circule dans le semi-conducteur se transforme inévitablement, pour partie, en énergie thermique, à cause de la résistance électrique du matériau (ce phénomène est aussi connu sous le nom de pertes par effet Joule). Plus l'intensité lumineuse envoyée vers la cellule est élevée, plus ces pertes résistives augmentent. À des intensités lumineuses trop fortes, elles deviennent même tellement importantes qu'elles entraînent la diminution du rendement de la cellule.

À ce jour, un semi-conducteur domine tous les autres pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Près de 90 % des cellules sont en effet fabriquées à partir de plaquettes de silicium, l'un des éléments les plus abondants sur Terre. Mais cette filière utilise un procédé nécessitant de nombreuses étapes et beaucoup de matière : il faut en effet 5 grammes de silicium pour produire 1 watt de puissance électrique. Cela représente un handicap intrinsèque, et pourrait être amélioré.

Dans cette idée, depuis quelques années, une seconde génération de cellules photovoltaïques émerge : les cellules en couches minces. Elles sont constituées d'un empilement de couches de matériaux, dont l'épaisseur totale est de l'ordre de quelques micromètres. Elles sont plus simples à préparer et bien plus économes en matières que celles en silicium : on atteint des quantités de matériaux >>>

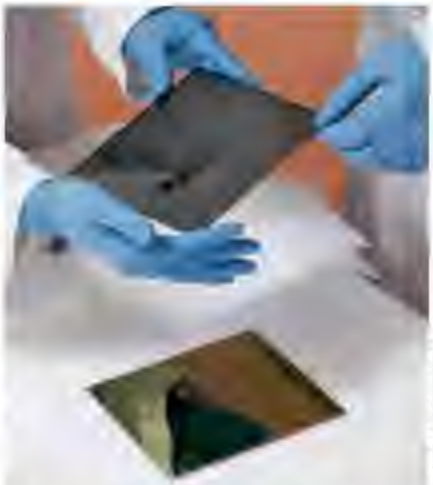
L'essentiel

- **POUR AMÉLIORER LA COMPÉTITIVITÉ** des cellules photovoltaïques, on cherche à réduire la consommation de matières premières, ou à améliorer leur rendement.
- **UNE ÉQUIPE FRANÇAISE** a mis au point une cellule photovoltaïque, constituée de couches minces, où la lumière est concentrée sur des points de quelques micromètres de diamètre.
- **LES PREMIERS TESTS** effectués montrent une augmentation de 30 % du rendement par rapport à une cellule classique en couches minces.

Au laboratoire de l'Institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (à gauche), un nouveau type de cellule est testé. Ci-dessus la cellule, vue au microscope électronique à balayage, apparaît au centre du cercle.

© PHILIPPE EKANI/EDF - EDF-R&D IRDEP

Une nouvelle génération de cellules photovoltaïques



© PHILIPPE FRAISSINET/CSI

Des couches minces de molybdène (ci-dessus) servent de contact métallique à l'arrière des nouvelles microcellules.

>>> inférieures à 1 milligramme par watt de puissance électrique.

Les meilleures performances des cellules en couches minces sont obtenues avec un alliage de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium, généralement désigné par l'abréviation « CIGS ». Les cellules CIGS atteignent aujourd'hui des rendements comparables à ceux du silicium, avec un record de 20,3 % obtenu en laboratoire [2]. Une autre technologie en couches minces bien développée à l'échelle industrielle est fondée sur le tellurure de cadmium (CdTe). Il existe aussi des cellules en couches minces à base de silicium amorphe, mais leurs rendements sont aujourd'hui plus faibles.

Éléments rares. Moindre coût de fabrication, réduction de la quantité de matière nécessaire et rendements équivalents à ceux du silicium : les technologies CIGS et CdTe sont prometteuses. Mais il y a une ombre au tableau : la disponibilité de certains éléments contenus dans ces alliages. L'indium comme le tellure sont en effet des éléments rares.

Ainsi, l'indium est un sous-produit de l'exploitation du zinc, dont on produit environ 640 tonnes par an (en 2011) ; on en récupère également environ 1 200 tonnes par an, grâce au recyclage. Outre le photovoltaïque, ce métal est utilisé largement dans la microélectronique ou pour les écrans plats, avec une consommation totale estimée à 1 800 tonnes par an en 2011. Ainsi la production annuelle pourrait bientôt ne plus être suffisante pour couvrir tous les besoins. On estime en effet qu'on ne pourra pas produire plus de 20 GW de panneaux en CIGS par an en 2020 [3].

Pour le tellure, sous-produit de l'extraction du cuivre, les chiffres sont très semblables, avec une production maximale annuelle de panneaux en CdTe estimée à 30 GW en 2020. Il faut donc trouver des solutions pour économiser l'indium et le tellure dans le futur.

Pour y parvenir, on estime qu'il faudrait mettre au point des panneaux photovoltaïques qui utilisent cent fois moins de matières premières rares. Une solution simple serait d'utiliser des couches plus minces qu'aujourd'hui. Dans notre laboratoire, nous étudions la possibilité de réduire l'épaisseur des couches de CIGS de 2 micromètres à 0,1 micromètre, soit d'un facteur 20 [4]. Nous étudions aussi l'opportunité de substituer l'indium par d'autres éléments chimiques (zinc, étain). Toutefois, les performances de ces matériaux de remplacement sont encore insuffisantes.

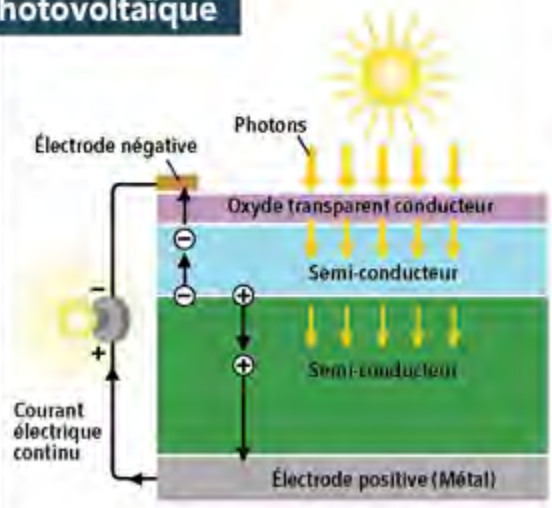
Nous avons donc recherché une solution dans une autre voie. En 2009, nous est ainsi venue l'idée d'explorer la piste de la concentration lumineuse. Ce type de système existait déjà pour les cellules issues de l'assemblage de différents composés cristallins à base d'arséniure de gallium, matériau semi-conducteur.

Pour concentrer la lumière, il faut utiliser un système optique, loupe ou lentille, qui permet de former une tache lumineuse petite et intense. Quand ces taches couvrent 1 % de la surface du panneau, la lumière se trouve concentrée 100 fois. La quantité de matériaux nécessaires s'en trouve réduite d'autant, pour une production électrique équivalente à celle d'un panneau classique. Plutôt que de placer des cellules solaires sur toute la surface du panneau, nous les mettons ainsi uniquement là où les lentilles concentrent la lumière [fig. 2].

Par ailleurs, la concentration lumineuse permet d'augmenter le rendement des cellules solaires. En effet, l'énergie électrique fournie par une cellule solaire est un équilibre entre une source – la lumière incidente – et des pertes – les recombinaisons. Plus on concentre la lumière arrivant sur une cellule solaire, plus le photocourant augmente ; cette augmentation se fait de manière

Fig.1 La cellule photovoltaïque

DANS UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE CLASSIQUE, les photons traversent d'abord un oxyde transparent. Puis ils parviennent à l'interface entre deux couches de semi-conducteurs, l'une plus riche en électrons (en bleu), l'autre moins riche (en vert). Certains sont absorbés, ce qui met en mouvement des charges positives et négatives, et génère un courant électrique.



© INFOGRAPHIES : ERWIN BOURGEOIS

linéaire. Les recombinaisons, elles, progressent beaucoup plus lentement : leur proportion devient donc de plus en plus petite, ce qui augmente le rendement.

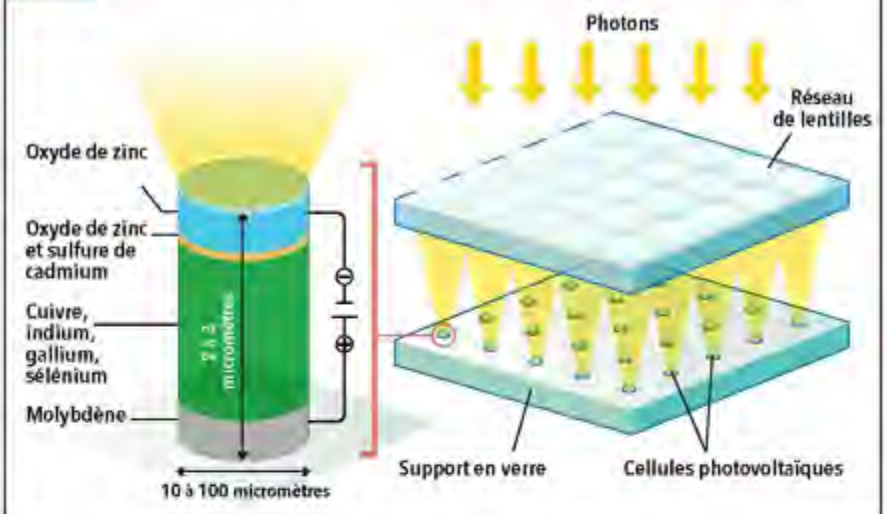
Mais, là encore, il y a des limites. Deux phénomènes ont particulièrement fait obstacle à l'utilisation de la concentration sur les couches minces dans les travaux antérieurs : les problèmes thermiques et les problèmes résistifs. Si la lumière est intense et que la cellule solaire évacue mal la chaleur, la température peut augmenter énormément, jusqu'à détruire la cellule. De plus, comme nous l'avons vu, l'énergie dissipée par la résistance électrique du semi-conducteur est d'autant plus élevée que l'intensité lumineuse augmente.

Pour des cellules en couches minces classiques, ces effets thermiques et résistifs sont trop forts pour que nous puissions utiliser des flux lumineux intenses. La miniaturisation des cellules change toutefois radicalement la situation.

Notre idée était d'avoir des cellules dont les dimensions latérales sont les plus petites possibles, en tout cas inférieures à 100 micromètres. Pour couvrir toute la surface du panneau photovoltaïque, il faut ainsi mettre plus de cellules. Mais, comme les microcellules évacuent mieux la chaleur que les grandes, leur échauffement, à intensité lumineuse équivalente, est moindre. Ainsi, quand une cellule d'un diamètre de 1 centimètre subit une augmentation de température de 1 000 °C sous une certaine intensité lumineuse, une cellule de 10 micromètres de diamètre, elle, chauffera seulement de 1 °C sous la même illumination. Là où la cellule de 1 centimètre serait complètement détruite, la cellule de 10 micromètres fonctionnera normalement.

À cet effet thermique s'ajoutent les effets résistifs. Ceux du semi-conducteur, bien entendu, mais aussi ceux dus à la couche d'oxyde transparent conducteur qui recouvre la face avant afin de collecter le courant. Comme son nom l'indique, cet oxyde laisse la lumière atteindre le cœur de la cellule solaire et conduit l'électricité. Cette couche est néanmoins environ 10 000 fois moins conductrice qu'un métal. Ainsi, lorsqu'elle est traversée sur quelques millimètres par des courants importants, les pertes résistives détériorent le fonctionnement des cellules. Ces pertes limitent l'augmentation du rendement que l'on obtient en concentrant la lumière.

Fig.2 La microcellule à concentration lumineuse



DANS CE NOUVEAU TYPE DE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE, les photons sont captés par des lentilles, qui les concentrent. Des cellules, disposées sous ces lentilles, récupèrent ensuite ces faisceaux. Si leur structure est celle des cellules traditionnelles - une couche d'oxyde conducteur (à gauche, en bleu), deux semi-conductrices (en jaune et en vert) et une métallique (en gris) -, leur diamètre n'est que de quelques dizaines de micromètres.

Microcellules. À l'inverse, plus la résistance est faible, plus le rendement maximal sera élevé. Là encore, c'est en diminuant la taille des cellules que l'on arrive à ce résultat. Ainsi une cellule solaire de 100 micromètres de rayon a aussi peu de pertes résistives sous un flux lumineux concentré 10 000 fois qu'une cellule de 1 centimètre de côté sous une lumière non concentrée. Les cellules en couches minces miniatures sont donc adaptées à un fonctionnement sous des flux lumineux intenses.

En 2011, nous avons fabriqué des prototypes de microcellules solaires CIGS de 3 micromètres d'épaisseur totale et de 50 micromètres de diamètre. Ils ont été réalisés en étroite collaboration avec les équipes de Jean-Luc Pelouard, du laboratoire de photonique et nanostructures du CNRS, et celle de Frédérique Donsanti, de l'Irdep. Nous les avons ensuite testés avec des lumières laser, dans des conditions équivalentes au rayonnement solaire. Sous lumière non concentrée, leur rendement est de 16 %. En les miniaturisant et en utilisant une lumière concentrée 475 fois, nous avons obtenu un rendement équivalent solaire de 21,3 %. Soit une augmentation du rendement de plus de 30 %, pour une cellule consommant 475 fois moins de matériaux [5].

Une telle concentration sur des couches minces est une première mondiale. Nos résultats sont d'autant plus remarquables qu'ils ont été validés par les premiers tests sous éclairement réel solaire concentré que nous avons réalisés au laboratoire CNRS-PROMES, à Odeillo, dans les Pyrénées orientales. ■

[1] M. Paire *et al.*, *Energy Environ. Sci.*, 4, 4972, 2011.
[2] P. Jackson *et al.*, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 19, 894, 2011.
[3] V. Fthenakis, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 13, 2746, 2009.
[4] Z. Jehl Li Kao *et al.*, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 5, 582, 2012.
[5] M. Paire *et al.*, *J. Renew. Sustain. Ener.*, sous presse, 2013.

Pour en savoir plus

> Cahier technologies, « L'énergie solaire », *Les Dossiers de La Recherche*, n° 7, décembre 2012.

Comment les astrocytes

Longtemps considérés accessoires, les astrocytes, cellules majoritaires dans le cerveau, sont en fait indispensables. Ils régulent la mise en mémoire des informations et la transmission des signaux nerveux.

PAR **Stéphane Oliet,** directeur de recherche au CNRS, et directeur adjoint du neurocentre Magendie, à Bordeaux.

ET **Thomas Papouin,** chercheur à l'école de médecine de l'université Tufts, à Boston.

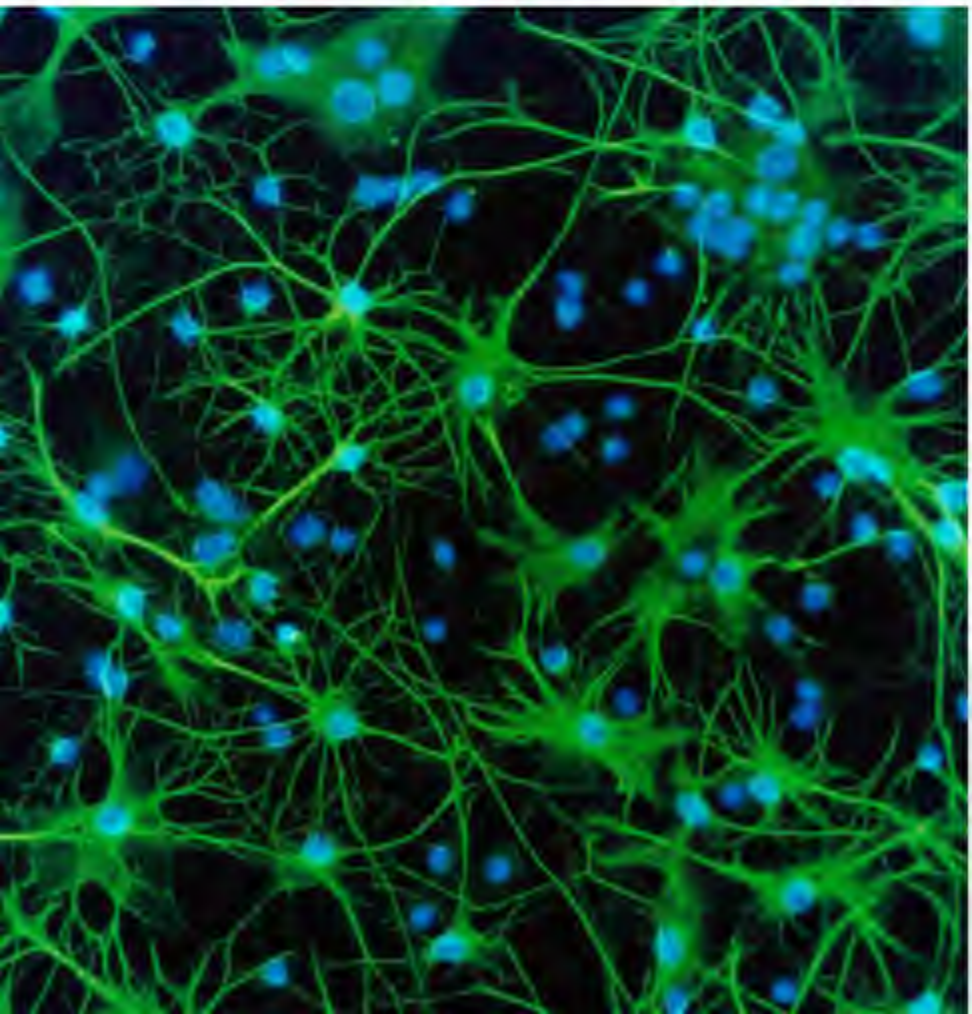
Le cerveau est constitué de neurones, c'est un fait aussi sûr que l'existence de planètes orbitant autour du Soleil. Pourtant, cette évidence est une approximation grossière. Car les neurones représentent moins de la moitié des cellules qui peuplent notre système nerveux – certaines études évoquent même le chiffre de 10 % seulement ! [1].

Pourquoi parle-t-on si peu des cellules majoritaires, les « cellules gliales » ? Parce qu'on a longtemps cru qu'elles n'assuraient que des fonctions subalternes. Mais aujourd'hui, cette conception du système nerveux est dépassée. C'est incontestable, les principales cellules gliales, les astrocytes, sont indispensables au fonctionnement cérébral dans ce qu'il a de plus fondamental : la communication entre les neurones et la mise en mémoire des informations au sein des circuits neuronaux.

Que de chemin parcouru depuis la première description des astrocytes, au XIX[e] siècle, par le neuropathologiste allemand Rudolf Virchow ! À l'époque, il évoque *« une sorte de glu dans laquelle sont pris les éléments du système nerveux »*. Le terme « glie », qui dérive de « glu », reflète la fonction de soutien physique qu'on attribue alors à ces cellules.

Cellules sans influx. Des pionniers, dont l'Espagnol Santiago Ramón y Cajal, ont déjà l'intuition d'un lien étroit entre cette « glie » et l'activité des neurones. Ils proposent même qu'elle exerce un rôle actif dans le fonctionnement du cerveau. Mais, contrairement aux neurones, les cellules gliales sont électriquement inactives, ce qui signifie qu'elles sont incapables de propager un influx nerveux porteur d'information. Pour cette raison, elles sont laissées de côté lorsque le terme de neurosciences apparaît au début des années 1960 pour désigner la branche des sciences biologiques s'intéressant au système nerveux.

Les neurones monopolisent alors l'attention. À l'époque, il s'agit avant tout



© NANCY KEDERSHA/SPL/COSMOS

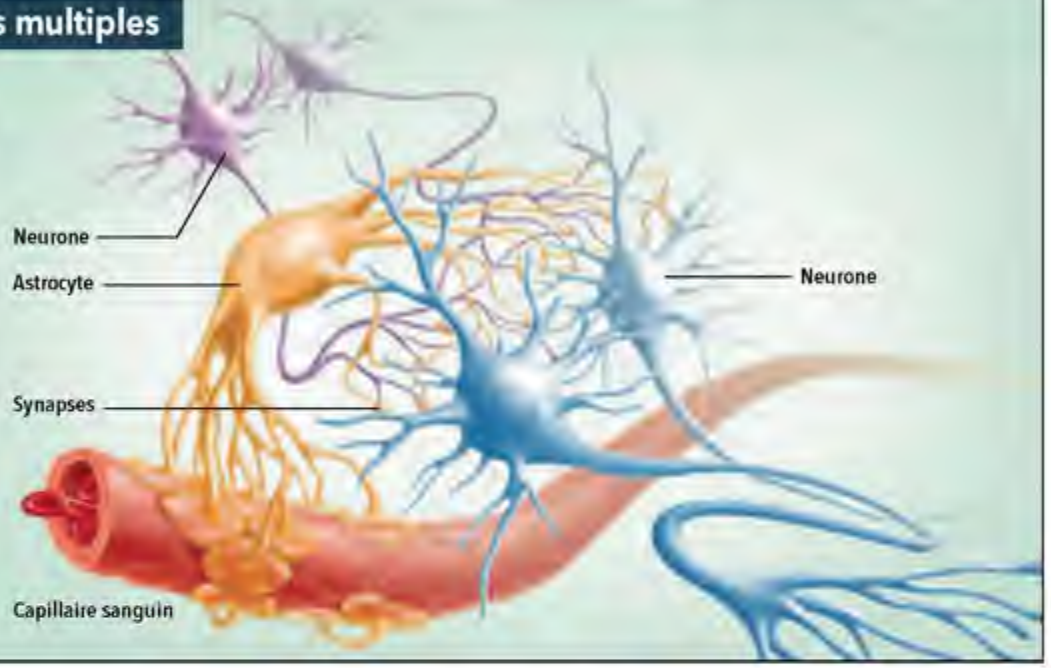
La forme étoilée des astrocytes (en vert) est ici mise en évidence par microscopie électronique à fluorescence. Les noyaux de toutes les cellules présentes (astrocytes et neurones) sont visibles en bleu.

contrôlent les neurones

Fig.1 Connexions multiples

UN ASTROCYTE est caractérisé par de longs prolongements dont les extrémités enveloppent les synapses et les capillaires sanguins. Il interagit avec les synapses situées à proximité, quel que soit le neurone auquel elles appartiennent. Il contrôle ainsi un territoire cérébral donné, au sein duquel il agit sur l'information échangée au niveau des synapses, et assure l'approvisionnement des neurones en énergie.

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT



de comprendre comment ils génèrent des signaux électriques porteurs d'information, et comment ils se les transmettent au niveau de la synapse, à travers la fente synaptique – mince espace qui sépare le prolongement d'un neurone du neurone suivant.

Lorsque, au cours des années 1970 et 1980, un schéma se dessine pour expliquer ce phénomène de transmission, il n'accorde aucune place aux astrocytes. On a beau savoir que leurs prolongements enrobent les synapses, la transmission synaptique est vue comme un concept purement neuronal : lorsque le signal électrique parvient à l'extrémité d'un neurone, il déclenche la libération, dans la synapse, de substances appelées neurotransmetteurs. Ceux-ci sont détectés par des récepteurs ancrés dans la membrane du neurone postsynaptique. L'activation de ces récepteurs déclenche alors la formation d'un nouveau signal électrique, qui se propage le long du neurone postsynaptique jusqu'au neurone suivant. Il aura presque fallu attendre le XXIe siècle pour que les astrocytes surgissent dans ce schéma neurocentré. À partir de la fin des années 1990, plusieurs études montrent que les astrocytes détectent les neurotransmetteurs libérés dans la synapse. Ils peuvent donc percevoir la transmission synaptique. Puis, au cours des années 2000, différents travaux prouvent qu'ils possèdent, ancrés dans leur membrane, des récepteurs aux neurotransmetteurs, similaires à ceux présents sur les neurones. Lorsqu'un neurotransmetteur s'y fixe, la concentration de calcium à l'intérieur des astrocytes augmente. Ce signal interne déclenche la libération, dans la fente synaptique, de substances appelées gliotransmetteurs, qui modulent la transmission des signaux neuronaux.

L'essentiel

> LES ASTROCYTES constituent plus de la moitié des cellules du cerveau.

> DEPUIS LE DÉBUT DES ANNÉES 2000, on sait qu'ils détectent les neurotransmetteurs libérés par les neurones

> ON A PROUVÉ RÉCEMMENT qu'ils contrôlent le fonctionnement des synapses et leur plasticité.

Synapse individuelle. En dépit de ces avancées, on ignore encore, alors, si cette influence des astrocytes s'exerce dans les diverses conditions d'activité neuronale envisageables. Se produit-elle uniquement lorsqu'un circuit neuronal est fortement stimulé, et que toutes les synapses d'un neurone sont activées ? Ou peut-elle avoir lieu même lorsque l'activité neuronale est faible, et à l'échelle d'une synapse unique ?

La réponse est venue en 2011, grâce aux travaux des équipes de Richard Robitaille et d'Andrea Volterra, respectivement à l'université de Montréal et à l'université de Lausanne. En effet, toutes deux ont indépendamment >>>

Comment les astrocytes contrôlent les neurones

>>> prouvé que la libération de gliotransmetteurs par les astrocytes est à l'œuvre au niveau de chaque synapse individuelle. Et cela, même lorsque l'activité des synapses est minimale [2]. Sachant qu'il existe plusieurs milliards de synapses dans notre cerveau, cela laisse entrevoir le pouvoir jusque-là insoupçonné des astrocytes à superviser les quantités phénoménales d'informations véhiculées à chaque instant par nos neurones.

Plasticité accrue. Toutefois, l'effet de la gliotransmission ne s'arrête pas là ! En 2010, en association avec le groupe de Dmitri Rusakov, à l'University College de Londres, nous avons montré qu'elle permet aux astrocytes de contrôler une autre propriété particulièrement importante des synapses : leur plasticité [3].

La plasticité des synapses tient à leur capacité à s'adapter en temps réel au flux d'informations qui les traverse, par des remodelages moléculaires et morphologiques. Cette faculté, qui constitue une forme de mémoire de leur activité passée, est le substrat biologique des phénomènes de mémoire et d'apprentissage. La découverte que les astrocytes contrôlent la plasticité représente donc une avancée majeure dans la compréhension des phénomènes de mémoire.

Comment les astrocytes exercent-ils ce contrôle ? Pour le comprendre, il faut savoir que la plasticité synaptique est régie par un récepteur ancré dans la membrane des neurones pré- et postsynaptiques : le récepteur NMDA. Il s'agit d'un récepteur au glutamate, le principal neurotransmetteur du système nerveux. Selon que l'activité d'une synapse est forte ou faible, l'activation de ce récepteur déclenche, dans les deux extrémités neuronales concernées, des réactions chimiques et des modifications morphologiques qui entraînent soit un renforcement, soit un affaiblissement persistant de la communication. Ce phénomène permet d'ajuster les propriétés de chaque synapse à son activité.

L'activation du récepteur NMDA dépend de deux substances : le glutamate libéré par le neurone présynaptique et une autre molécule dont on a reconnu l'existence en 1987, sans que sa nature, ni sa provenance soient identifiées. Vingt ans plus tard, c'est précisément ce que nous avons fait : nous avons démontré qu'il s'agit d'un acide aminé, la D-sérine, et qu'il est libéré par les prolongements des astrocytes qui entourent les synapses [3]. Lorsque la synthèse ou la libération de D-sérine sont bloquées dans l'astrocyte qui se trouve au contact de synapses, ces dernières perdent leur plasticité. Cette démonstration est d'autant plus intéressante qu'elle a été réalisée sur des sections d'hippocampe, région cérébrale impliquée dans la mémoire et l'apprentissage. Elle laisse donc présager un rôle direct des astrocytes dans les processus cognitifs et comportementaux.

À elle seule, la découverte du phénomène de gliotransmission, c'est-à-dire la capacité des astrocytes à libérer des transmetteurs pour influencer l'activité synaptique, constitue donc un tournant décisif de l'histoire récente des neurosciences. Mais l'impact des astrocytes sur le transfert d'information et la mémoire ne s'arrête pas là. Récemment, plusieurs équipes ont montré qu'ils agissent également par le biais d'un mécanisme indirect : le contrôle des apports énergétiques reçus par les neurones.

Transport d'énergie. Dès le XIXe siècle, l'Italien Camillo Golgi avait noté que les astrocytes possèdent une position intermédiaire et très stratégique entre les vaisseaux sanguins et les neurones. Il avait alors soupçonné qu'ils puissent jouer un rôle central dans l'approvisionnement des neurones en énergie. Néanmoins, l'idée que les neurones soient intimement assujettis aux astrocytes par une forme de dépendance énergétique est restée dans l'ombre pendant presque un siècle.

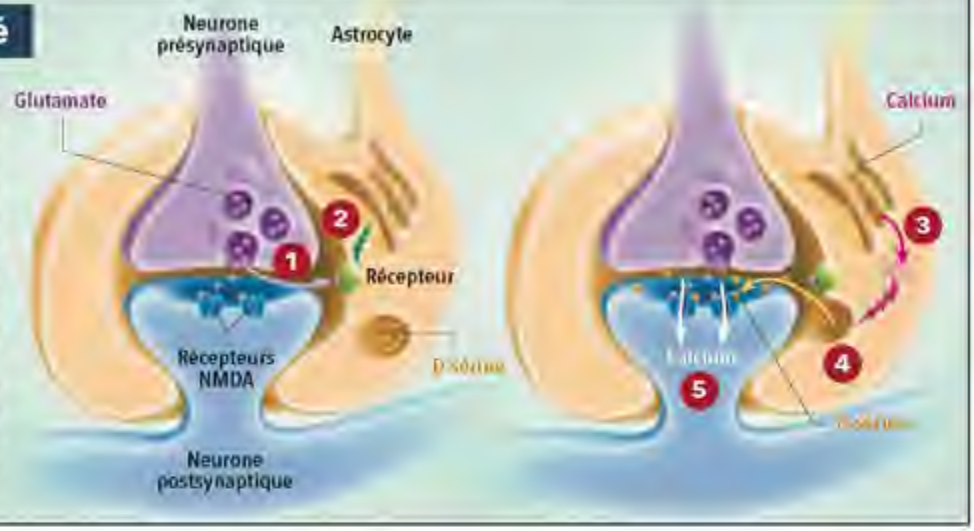
Ce n'est que dans les années 1990 que différentes équipes ont montré que les besoins énergétiques des neurones sont effectivement pris en charge par les astrocytes. Ces derniers prélèvent le glucose de la circulation sanguine et le transforment en lactate qu'ils fournissent ensuite aux neurones. Les astrocytes peuvent aussi stocker les excédents de glucose sous forme de glycogène, et le restituer si besoin aux neurones sous forme de lactate.

En 2008, l'équipe canadienne de Brian MacVicar, de l'université de Colombie-Britannique, à Vancouver, au Canada, a révélé que cet approvisionnement des neurones en énergie est régulé de façon extrêmement précise par les astrocytes [4]. En effet, ils détectent la

Les différents types de cellules gliales

Le terme de cellules gliales regroupe les cellules non neuronales du système nerveux : les astrocytes, les cellules microgliales et les oligodendrocytes. Les cellules microgliales sont les plus petites cellules gliales. On considère qu'elles représentent le système immunitaire du système nerveux. Plusieurs travaux récents suggèrent qu'elles auraient aussi, à l'instar des astrocytes, un rôle dans la communication entre neurones. Les oligodendrocytes, quant à eux, sont des cellules gliales dont la fonction majeure est d'envelopper l'axone des neurones d'une gaine isolante qui aide à la propagation rapide de l'information nerveuse dans le cerveau et la moelle épinière. Dans le système nerveux périphérique, cette fonction est remplie par des cellules appelées cellules de Schwann.

Fig.2 Récepteur activé



DANS UNE SYNAPSE, un astrocyte contrôle l'activité d'un récepteur neuronal appelé NMDA (en bleu). Lorsque du glutamate est libéré dans la synapse, il se fixe sur ce récepteur et sur un récepteur astrocytaire (en vert) (1). Celui-ci est activé (2), et les réservoirs de calcium de l'astrocyte se vident (3). L'astrocyte libère alors de la D-sérine (4), qui se fixe sur le NMDA porteur de glutamate. Ce n'est qu'à ce moment que du calcium peut entrer dans le neurone postsynaptique (5).

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

consommation en oxygène des neurones, qui reflète l'activité de ces derniers, et donc leurs besoins en nutriments. En fonction de ces besoins, les astrocytes libèrent alors des composés qui agissent sur la paroi des petites artères cérébrales et des capillaires sanguins pour provoquer leur dilatation ou leur constriction. Cela permet d'ajuster le flux sanguin et de laisser passer plus ou moins de nutriments et d'oxygène.

Ce phénomène vasculaire paraît éloigné de la transmission synaptique et de la mémoire. Pourtant, en 2009, l'équipe de Christian Giaume et de Nathalie Rouach, au Collège de France, à Paris, a confirmé que, sans l'apport de lactate par les astrocytes, la transmission synaptique entre neurones s'effondre. L'échange d'information n'est plus assuré, faute d'énergie [5]. Puis, en 2011, l'équipe de Pierre Magistretti, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et celle de Cristina Alberini, de l'école de médecine du Mont-Sinaï, à New York, ont observé que lorsque des rongeurs apprennent une nouvelle tâche, le taux de glycogène diminue dans leur cerveau, tandis que le niveau de lactate augmente.

Mémoire ou amnésie. En réalité, bloquer la transformation du glycogène en lactate ou empêcher le transport de lactate depuis les astrocytes vers les neurones suffit à rendre les rongeurs amnésiques [6] ! La transformation du glycogène en lactate par les astrocytes puis le transfert de ce lactate vers les neurones sont donc nécessaires aux processus de mémorisation. Actuellement, il n'y a plus aucun doute : la communication élémentaire entre les neurones et la mise en mémoire d'informations au sein des circuits neuronaux nécessitent la participation active des astrocytes.

Ces avancées mettent aussi en avant l'importance du réseau que forment les astrocytes, réseau qui semble à la fois superposé et intégré au réseau de neurones sous-jacent, pour superviser ses « faits et gestes ». Possède-t-il sa propre manière de gérer l'information ? Si oui, est-elle comparable à celle du réseau de neurones ? Quelle que soit la réponse, les astrocytes devraient devenir les stars des neurosciences du XXIe siècle, comme acteurs décisifs du fonctionnement cérébral et, par conséquent, comme cibles thérapeutiques potentielles pour le traitement de certaines pathologies. ■

Réseaux d'astrocytes

À l'extrémité de leurs prolongements, les astrocytes sont connectés entre eux par des jonctions dites « communicantes », qui forment des pores permettant l'échange direct de certaines substances. L'étendue du réseau astrocytaire sous-tendu par ces jonctions peut aller de quelques cellules à plusieurs centaines. C'est un moyen efficace et fiable de maintenir une communication directe et d'échanger des informations et des substances. Ces jonctions semblent indispensables au passage de glucose ou de lactate d'un astrocyte à un autre, même très éloigné, et à la propagation des signaux constitués par les élévations de la concentration de calcium. On considère aujourd'hui que différents assemblages d'astrocytes veillent chacun sur un volume de tissu cérébral bien délimité : on parle de domaines. L'étendue de ces domaines est liée à l'organisation neuronale et vasculaire sous-jacente et peut se remodeler de manière dynamique en fonction de l'activité neuronale.

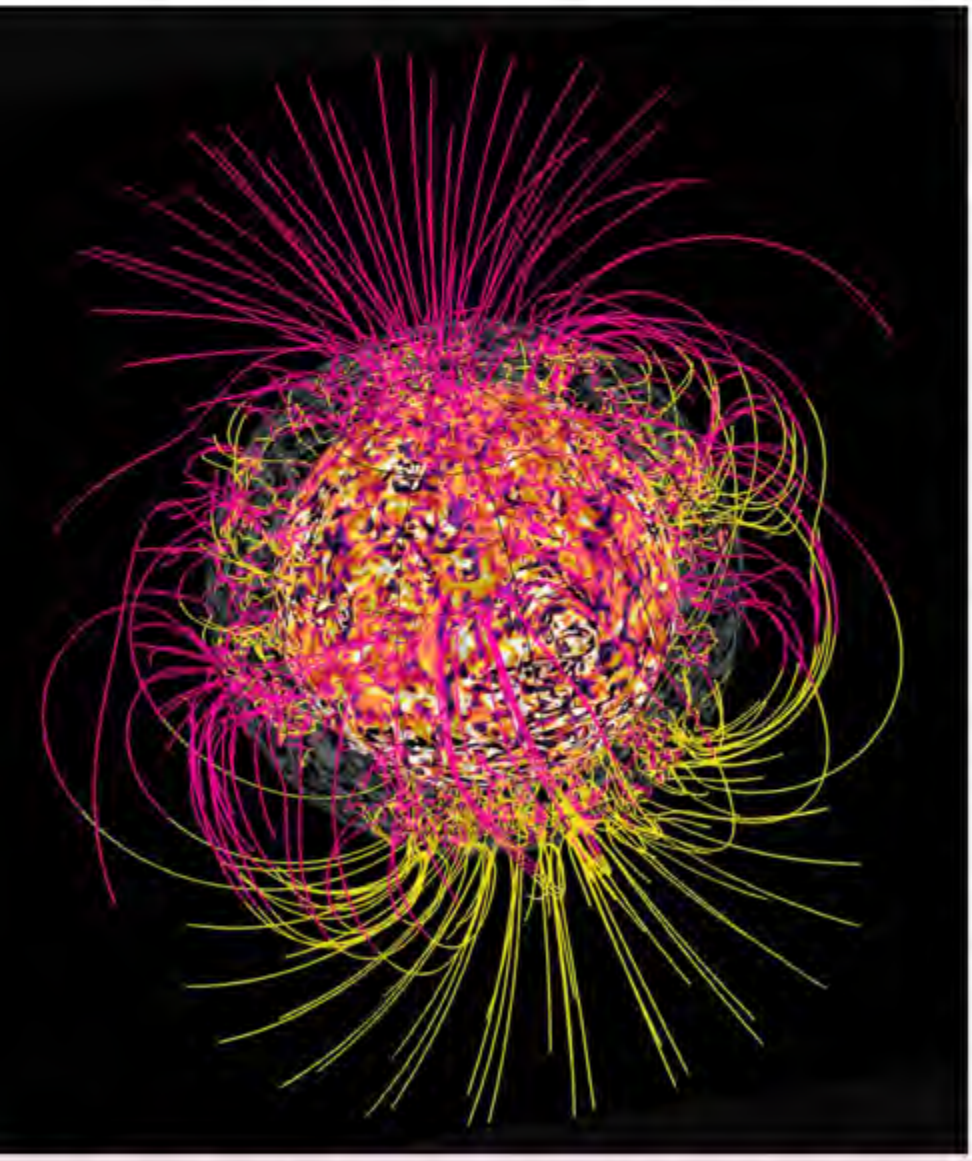
[1] E.R. Kandel, J.H. Schwartz et T.M. Jessell (dir.), *Principles of Neural Science, Nerve Cells and Behavior*, 4th edn, McGraw-Hill, p. 221, 2000.
[2] A. Panatier *et al.*, *Cell*, *146*, 785, 2011 ; M.A. Di Castro *et al.*, *Nat. Neurosci.*, *14*, 1276, 2011.
[3] C. Henneberger *et al.*, *Nature*, *463*, 232, 2010 ; T. Papouin *et al.*, *Cell*, *150*, 633, 2012.
[4] G.R. Gordon *et al.*, *Nature*, *456*, 745, 2008.
[5] N. Rouach *et al.*, *Science*, *322*, 1551, 2008.
[6] A. Suzuki *et al.*, *Cell*, *144*, 810, 2011.

Pour en savoir plus

> Giovanni Marsicano et Mathilde Metna-Laurent, *Comment le cannabis altère la mémoire*, *Les Dossiers de La Recherche n°49*, juin 2012, p. 25.

Simuler le champ magnétique du Soleil

De nouveaux modèles numériques reconstituent la physique à l'œuvre au sein de notre étoile. Ils permettent de mieux comprendre l'origine de son champ magnétique.



PAR **Sacha Brun,** directeur du laboratoire de dynamique des étoiles et leur environnement, du CEA, à Saclay.

LAURÉAT **du prix *La Recherche* 2011, mention astrophysique**

D'où vient le champ magnétique du Soleil ? Depuis plus d'un siècle, cette question intrigue les astrophysiciens. Au-delà de l'enjeu académique, le défi est aussi pratique : l'activité magnétique intense de notre étoile et le vent solaire associé qui s'échappe de sa surface perturbent régulièrement les satellites et les réseaux électriques. Afin de pouvoir prédire ces incidents, et s'en protéger, il est indispensable de mieux comprendre l'origine du magnétisme solaire.

Seulement notre étoile est difficile à décrire. Loin d'être un astre lisse et immuable, cette boule de gaz bouillonne et éjecte de la matière en permanence. La compréhension de cette activité débordante est un préalable essentiel pour appréhender son magnétisme.

Alors, l'astrophysicien, en complément des observations et des

Sur cette simulation du champ magnétique solaire, apparaissent en jaune les lignes de champs qui sortent du Soleil (polarité positive) et en violet les lignes qui y rentrent (polarité négative). On distingue la composante dipolaire, qui sort des pôles, et la bande d'activité à moyenne latitude où se forment les boucles. © DR, A.S. BRUN, CEA-SACLAY, WWW.STARS2.EU

expériences de laboratoire, expérimente numériquement. Les simulations informatiques permettent en effet de prendre en compte les mécanismes physiques essentiels impliqués dans l'activité du Soleil. En les comparant aux observations, on vérifie ensuite leur pertinence.

Un pas important vient d'être franchi dans ce sens par notre équipe dans le cadre du projet européen STARS2. Ces nouvelles simulations tridimensionnelles sont parvenues à modéliser avec une résolution jamais atteinte auparavant la dynamique interne du Soleil et le champ magnétique externe qui en découle. En appliquant nos modèles à d'autres étoiles, nous avons aussi mis en évidence la variété et l'importance des mécanismes qui concourent au phénomène complexe qu'est la génération des champs magnétiques des étoiles.

Taches sombres. La connaissance du champ magnétique solaire est historiquement liée à l'observation des taches solaires, zones sombres situées à la surface du Soleil que Galilée identifie dès le XVII[e] siècle. Depuis leur découverte, elles font l'objet d'une étude systématique.

Vers le milieu du XIX[e] siècle, on constate que ces taches sombres apparaissent et disparaissent selon un cycle de onze ans. Mais ce n'est qu'en 1908 que l'astronome américain George Hale associe ces taches à la présence de champ magnétique à la surface du Soleil : il y détecte un élargissement des raies atomiques dû au champ magnétique (effet Zeeman*). C'est la première mesure d'un champ magnétique hors de la Terre.

En 1919, Hale va plus loin en établissant que les taches, lorsque leur nombre augmente, ont tendance à se rapprocher de l'équateur, formant ainsi comme des ailes de papillon. Il constate également que, environ tous les onze ans, la polarité des taches, c'est-à-dire leur orientation nord ou sud de leur champ magnétique, s'inverse dans chaque hémisphère. Il prouve ainsi que le champ magnétique solaire est cyclique, et qu'un cycle complet dure environ vingt-deux ans.

Pour expliquer l'origine de ce champ magnétique, Sir Joseph Larmor, physicien irlandais, propose en 1919 l'idée selon laquelle celui-ci est induit par un « effet dynamo ». Il définit alors ce phénomène comme la capacité d'un fluide conducteur à engendrer un champ magnétique par ses mouvements et à le maintenir malgré les pertes d'énergie sous forme de chaleur.

Que sait-on de la structure interne de notre étoile ? Les premiers modèles de structure, établis dans les années 1950, ont révélé que le Soleil comprend un cœur radiatif, où le transfert de chaleur s'effectue par rayonnement du centre vers les couches extérieures, et une enveloppe convective, où l'énergie thermique est transportée par les mouvements de gaz à grande échelle [fig. 1]. À partir de cette structure interne, les physiciens ajoutent la dynamique et construisent un modèle théorique afin de décrire le fonctionnement de l'effet dynamo et expliquer l'origine des taches solaires.

En 1955, l'astrophysicien américain Eugene Parker propose la « dynamo distribuée » pour expliquer les propriétés magnétiques observées, notamment le diagramme papillon [fig. 2]. Ce modèle place l'origine du champ magnétique dans la zone convective : les mouvements du plasma*, constitué de particules chargées, engendrent des courants électriques qui créent des champs magnétiques cycliques. Ceux-ci entraînent à leur tour le plasma, et ainsi de suite. Ce modèle décrit bien les observations de la structure globale du champ magnétique : des lignes de champ émergent des pôles de notre étoile et forment une boucle extérieure ; ce >>>

Fig.1 Structure interne

À LA SURFACE DU SOLEIL, les taches solaires sont une manifestation de la présence du champ magnétique. En dessous, la zone convective, siège de grands mouvements d'ensemble du plasma, s'étend sur 200 000 kilomètres de profondeur. Puis, en s'enfonçant, on traverse une zone d'interface, la tachocline. On atteint alors la zone radiative. Celle-ci rayone l'énergie produite par les réactions nucléaires qui ont lieu au centre de l'étoile.

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

L'essentiel

> UN NOUVEAU MODÈLE permet de reproduire en trois dimensions et avec une résolution jamais atteinte l'activité interne du Soleil.

> LA TRANSPOSITION DU MODÈLE à de nombreuses autres étoiles précise les mécanismes à l'origine du champ magnétique.

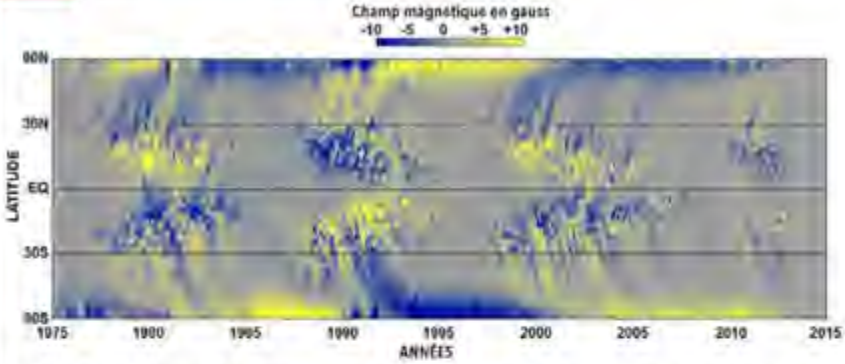
> PROCHAINE ÉTAPE : mieux connaître la durée des cycles des étoiles afin de les comparer à ceux obtenus par les simulations.

*L'EFFET ZEEMAN décrit le fait que les niveaux d'énergie d'atomes plongés dans un champ magnétique statique se subdivisent.

*LE PLASMA est un gaz globalement neutre dans lequel l'ionisation sépare les charges électriques. Le plasma est le principal constituant des étoiles et des nuages interstellaires.

Simuler le champ magnétique du Soleil

Fig.2 Les taches solaires



CE DIAGRAMME synthétise les zones d'émergence des taches solaires observées depuis trente ans. Les taches migrent vers l'équateur au cours d'un cycle solaire d'environ onze ans, puis leur polarité s'inverse, revenant à leur polarité initiale après un cycle complet d'environ vingt-deux ans. La composante du champ magnétique de polarité positive apparaît en jaune, et la composante négative en bleu. © HATHAWAY/NASA/MSFC /2012/12

>>> champ dit « poloïdal » se régénère ensuite à partir d'autres lignes de champ horizontales (le champ toroïdal), etc.

Les théoriciens semblent alors tenir un bon modèle de la dynamo solaire, mais l'émergence, dans les années 1970, d'une nouvelle technique d'observation, l'héliosismologie, apporte des éléments inédits. L'héliosismologie est à l'étude du Soleil ce que la sismologie terrestre est à celle de la structure interne de la Terre. Elle est fondée sur l'analyse des ondes acoustiques se propageant dans le Soleil. En effet, les propriétés des ondes sonores varient selon les conditions physiques et les mouvements de l'intérieur de notre étoile.

Grâce à cette technique qui ouvre une fenêtre sur l'intérieur du Soleil, Kenneth Libbrecht, de l'institut de technologie de Californie, à Pasadena, aux États-Unis, et d'autres dévoilent dans les années 1980 l'existence d'une zone de transition, située entre l'enveloppe convective et l'intérieur radiatif. Jean-Paul Zahn, de l'observatoire de Paris, et Edward Spiegel, de l'université Columbia, à New York, la baptisent « tachocline ». Cette région est le siège d'un fort cisaillement, c'est-à-dire d'un étirement entre deux couches qui se déplacent à des vitesses différentes. Ces cisaillements sont susceptibles d'étirer les lignes de champ magnétique en formant des rubans magnétiques qui correspondent à des lignes de champ toroïdaux.

Interface. De fait, le modèle de dynamo distribuée, qui plaçait la génération du champ magnétique poloïdal et toroïdal dans la zone convective uniquement, laisse la place dans les années 1990 à un nouveau modèle théorique, celui de dynamo d'interface, également dû à Eugene Parker. Dans celui-ci, le champ poloïdal prend sa source dans la zone convective, tandis que le champ toroïdal émerge dans la tachocline.

L'héliosismologie a également levé le voile sur la façon dont tournent les différentes couches du Soleil. Elle montre que la différence de vitesse que l'on observe en surface suivant la latitude (plus rapide à l'équateur, plus lent aux pôles) persiste sur les 200 000 kilomètres de profondeur de l'enveloppe convective. Autrement dit, le profil de rotation dans l'enveloppe convective n'est pas un cylindre, comme on le croyait sur la base d'arguments théoriques, mais un cône. Pourtant, les anciens modèles fondés sur ce profil de rotation reproduisaient fidèlement les observations de l'époque. Ce qui signifie que reproduire des observations ne suffit pas à prouver que l'on détient la bonne explication.

Au vu de la complexité du phénomène, seules des simulations globales en trois dimensions et à haute résolution peuvent aider à préciser les processus en jeu. Il devient en effet indispensable de déterminer, en chaque point du modèle de l'étoile, les propriétés de la turbulence, influencées simultanément par la convection, la rotation et le magnétisme, mais aussi par une forte stratification en densité et en température.

Ces codes numériques, qui peuvent simuler une étoile avec plus de 2 milliards de points, sont très gourmands en temps de calcul : une simulation requiert de 1 à 2 millions d'heures de calcul sur un processeur, ce qui prendrait jusqu'à deux cent cinquante ans sur une machine standard. C'est pourquoi ces codes ont été parallélisés et tournent sur des calculateurs haute performance comportant plusieurs

Détecter la vie sur les exoplanètes

Comprendre l'effet dynamo et le magnétisme qui en résulte, tant au sein des étoiles que des planètes, pourrait nous aider à évaluer l'habitabilité de « superterres ». Dans la prochaine décennie, les astronomes observeront en effet des exoplanètes de masse similaire à celle de la Terre autour d'étoiles moins massives que le Soleil. Ces étoiles actives émettent un flux de particules chargées, baptisé vent stellaire. Le vent stellaire interagit avec l'enveloppe magnétique de l'exoplanète, qui, à l'instar de la magnétosphère sur la Terre, forme un bouclier protecteur de ces influences létales. L'habitabilité des exoplanètes dépend donc beaucoup de la relation magnétique entre la planète et son étoile.

milliers de processeurs. Le temps nécessaire pour effectuer une simulation est ainsi réduit à quelques mois.

Avant de faire une simulation complète, nous nous sommes attachés à comprendre la turbulence. À l'aide d'un premier modèle uniquement hydrodynamique, nous avons contribué à expliquer le profil conique de la rotation différentielle du Soleil [1]. Nous nous sommes aperçus que le transport de chaleur en latitude jouait un rôle clé.

Habituellement, un fluide en rotation a tendance à être invariant le long de l'axe de cette rotation. Nos résultats indiquent qu'une différence de température en latitude de 10 kelvins à la base de la zone convective modifie un profil de rotation cylindrique en un profil conique. Il s'agit donc d'une infime différence de température que seule une excellente résolution des simulations permet d'établir avec précision. Pour donner un ordre d'idée, il règne au centre du Soleil plus de 16 millions de degrés, 2 millions à la base de la zone convective, tandis que la température de surface est de 5800 kelvins.

Dans une deuxième étape, nous avons associé à ce premier modèle l'intérieur radiatif du Soleil et l'avons couplé aux phénomènes turbulents de surface. Ainsi, non seulement on peut étudier le mécanisme de dynamo, mais aussi évaluer comment la présence de la tachocline influe sur cette dynamo. L'un des principaux résultats est la validation du concept théorique de dynamo d'interface : dans nos simulations, on voit le champ magnétique, créé par la turbulence convective, transporté vers le bas, vers la tachocline ; de là, il s'organise en rubans de champ magnétique toroïdal [2]. Toutefois, les cycles magnétiques que nous obtenons, de l'ordre d'un ou deux ans, sont trop courts étant à comparer avec la périodicité de onze ans.

© CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

La vitesse de rotation des zones situées à l'intérieur du Soleil est mesurée grâce à l'héliosismologie (les zones en rouge sont les plus rapides, et les zones en bleu les plus lentes).

* **LA FORCE DE CORIOLIS** agit perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps (ici un fluide) en déplacement dans un milieu en rotation uniforme.

Profil cylindrique. Face aux limitations de nos modèles, comment aller plus loin dans la compréhension de la dynamo ? En plus d'expériences numériques, l'astrophysicien dispose parfois d'une collection d'objets qu'il peut comparer. Or, nous disposons justement de beaucoup d'étoiles dont les caractéristiques magnétiques ont été déterminées ces dernières années.

Plusieurs centaines d'observations faites au sol et de l'espace, notamment à l'aide des satellites Kepler et Corot, ont montré que les étoiles qui possèdent une zone convective en surface sont magnétiquement actives. Par ailleurs, toutes les étoiles de type solaire (aux caractéristiques spectrales analogues à celles du Soleil) possèdent un champ magnétique dont le cycle d'apparition des taches est compris entre deux et vingt-cinq ans. En outre, les étoiles tournant rapidement sont souvent très actives, et leur champ magnétique principalement toroïdal.

En adaptant nos modèles au cas de ces étoiles, nous avons pu faire varier les différents paramètres et avons réussi à identifier les processus physiques (turbulence, force de Coriolis*, gradient thermique...) à l'origine de forts cisaillements. La vitesse de rotation joue un rôle majeur. Ainsi, pour des étoiles jeunes de type solaire, qui tournent rapidement, de forts champs magnétiques toroïdaux naissent dans la zone convective et pas uniquement dans la tachocline [3]. Dans ce cas, la rotation rapide semble même favoriser la création de rubans magnétiques et leur émergence [4].

Cependant, la méconnaissance de la durée précise des cycles stellaires ne permet pas de les comparer à celle des cycles obtenus lors des simulations. Gageons que de nouveaux instruments plus performants et des durées d'observation plus longues nous procureront des données plus précises dans les années à venir.

En attendant, grâce à nos simulations, nous avons désormais une image bien plus précise des processus physiques qui concourent à l'effet dynamo au sein du Soleil et des étoiles. Nous comprenons notamment comment ces processus varient selon la rotation, la masse et l'âge de l'étoile.

Cela étant, chaque simulation prenant un semestre, nous n'avons pas encore exploré toutes les valeurs possibles des paramètres. De plus, les informations issues des simulations sur les autres étoiles font ressortir de nouveaux phénomènes et paramètres intéressants que nous sommes en train d'intégrer au sein d'un nouveau modèle. Ce modèle décrira la turbulence magnétisée de manière encore plus réaliste et une stratification complète jusqu'au centre de l'étoile. Les simulations serviront alors à formaliser l'effet dynamo selon le type d'étoile, puis à expliquer ses manifestations en surface, et leur éventuel effet sur la Terre. Reste à bien comprendre comment les cycles magnétiques sont établis. Pour cela, les allers et retours entre observations et simulations resteront indispensables. ■

[1] S. Brun *et al.*, *ApJ* 742 79, 1, 2011.
[2] M. K. Browning *et al.*, *ApJ* 648, L157, 2006.
[3] B. P. Brown *et al.*, *ApJ* 731 69, 2011.
[4] N. J. Nelson *et al.*, *ApJ* 739 L38, 2011.

Pour en savoir plus

> **www.stars2.eu** Le projet de simulations de la turbulence, de l'activité et de la rotation du Soleil et des étoiles, financé par le Conseil européen de la recherche (en anglais).

En vente actuellement

Cahier réalisé en partenariat avec :

ADEME

CRITT MATERIAUX ALSACE

© R. BOURGUIGNON, LE GOFF, C. WEISS / ADEME

RECYCLAGE

Vers une économie circulaire

Recycler c'est utile. C'est indispensable. Pour préserver l'environnement comme pour faire face à la diminution des ressources naturelles. Le recyclage permet de valoriser les matières contenues dans les déchets, grâce notamment aux progrès des technologies de dépollution et de tri. L'enjeu est désormais de produire, le plus possible, des matières recyclées de qualité quasi comparable à la matière vierge, et de les produire en quantité avec moins d'impact sur l'environnement. Ceci impliquera de recycler plus dans le même usage (en boucle fermée). C'est l'étape nécessaire pour entrer dans une économie circulaire où la matière est capable de vivre plusieurs vies au sein de produits de qualité. Avant d'y parvenir, la recherche a encore de nombreux freins à débloquer. Mais l'industrie dispose déjà d'un allié de choix avec l'éco-conception. En prenant en compte le recyclage dès la conception d'un produit, la réutilisation de la matière sera considérablement simplifiée et sa qualité améliorée.

> P. 66 Du recyclage à l'éco-conception

> P. 68 Les défis organisationnels et technologiques

> P. 70 Les petits ruisseaux font les grandes rivières

> P. 70 Solvay recycle les terres rares

> P. 71 Les collants Dim, du berceau au berceau

> P. 71 Maîtriser le tri des plastiques

Du recyclage à l'éco-conception

Tenir compte du recyclage dès la conception d'un produit est le moyen de faciliter le recyclage de la matière. Cette démarche n'est pas seulement une contrainte. Elle se traduit aussi par des avantages en termes de coût.

Le recyclage ? Difficile d'être contre. La récupération et la valorisation des déchets répondent en effet à de multiples enjeux. L'économie des matières premières ou d'énergie – et leur sécurité d'approvisionnement – est le plus évident. Il devient d'ailleurs crucial alors que les ressources naturelles sont de plus en plus convoitées. L'augmentation de la population mondiale, qui devrait croître de 30 % d'ici à 2050 pour atteindre neuf milliards de personnes, y participe largement.

Ce n'est pas la seule motivation. De nombreuses études ont montré que le recyclage apportait dans la plupart des cas des bénéfices environnementaux, comme l'atténuation du réchauffement climatique via la réduction d'émissions de CO_2. Le troisième enjeu, enfin, est économique et se mesure en termes de maîtrise des coûts et de développement industriel de nouvelles technologies.

Si tout le monde peut s'accorder sur les mérites du recyclage et la qualité de la plupart des produits recyclés commercialement disponibles, à y regarder de plus près, certaines questions méritent d'être posées. Ne faudrait-il pas, avant de décider de recycler un matériau, connaître le bilan environnemental de sa collecte, de son tri et de son traitement ? Est-il favorable ? Est-il possible de choisir des technologies de recyclage qui conservent aux matières leurs propriétés mécaniques, rhéologiques, leurs couleurs, leur aspect, etc. ? Quelles sont les limites technologiques et organisationnelles du recyclage en boucle fermée, c'est-à-dire qui utilise la matière de recyclage pour un usage et une destination identiques ?

Cette réalité conduit aujourd'hui à envisager le recyclage sous un autre angle. Autrement dit, recycler, oui, mais si les bénéfices économiques s'accompagnent d'un bilan environnemental positif. Oui, mais si les matières premières de recyclage sont de qualité, d'une qualité presque comparable à la matière vierge. Ces deux défis sont au cœur de ce qu'il est convenu d'appeler l'« économie circulaire », une notion qui élargit le concept de recyclage.

Penser économie circulaire, c'est raisonner non plus en termes de produits et de stock de déchets, mais en flux de matière. Ce qui signifie penser à partir de la matière première initiale et s'intéresser à tous les services qu'elle fournira tout au long de sa durée de vie, ou plutôt de ses vies : de ses avatars, sous forme d'autant de produits réparés, remis à neuf, démantelés ou recyclés. Exemple dans le secteur des fournisseurs d'accès Internet, propriétaires de grandes séries homogènes, où les équipements sont loués et récupérés ; commence alors l'industrialisation de la réparation, voire la remise à neuf d'équipements, ce qui participe à la rentabilité de ces acteurs ; les investissements de départ sont évités et la durée de vie du matériel est prolongée au-delà de sa durée d'amortissement. Afin de faciliter les opérations de réparation, ces opérateurs introduisent aussi des

Collecter, c'est bien. Mais plus le produit aura été conçu en vue du recyclage, plus il sera simple d'obtenir une matière recyclée de qualité.

© ARNAUD BOUISSOU/MEDDE

notions d'éco-conception dans leurs cahiers des charges auprès des fabricants de box.

Pour aller dans cette direction, l'idéal est de commencer… au plus tôt. C'est-à-dire de poser la problématique du recyclage dès la conception d'un produit, de l'intégrer pleinement dans une démarche d'éco-conception. Cette démarche s'étend bien au-delà du seul recyclage. Elle cherche à concevoir un produit de façon à minimiser ses impacts sur l'environnement et cela tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie, en passant par les étapes de transport, production et utilisation.

Intégrer vraiment le recyclage dans l'éco-conception, conduit donc à concevoir un produit afin qu'il soit plus facilement recyclable. Éviter, par exemple, qu'il contienne des substances indésirables, coûteuses à éliminer lors de la phase de recyclage, ou compliquant la phase de tri. Ou encore concevoir un produit facilement démontable. Ou diminuer la variété des matières au sein d'un même composant (on pense aux tableaux de bord automobiles). Ou simplement, éliminer le superflu, se dispenser d'une fonctionnalité peu utile, mais qui a un impact important en termes de recyclabilité. Toutes ces pratiques aboutissent à faciliter le tri et, ce faisant, à obtenir des matières recyclables plus homogènes, donc de meilleure qualité.

ANALYSER LE CYCLE DE VIE DU PRODUIT

Cette démarche peut sembler une évidence dictée par le simple bon sens. En réalité, elle représente un défi de taille pour les entreprises. C'est bien de concevoir un produit pour qu'il soit facilement recyclable, mais il doit d'abord se vendre, c'est-à-dire ne pas voir ses performances baisser et être produit à un coût acceptable. Ensuite, le problème est complexe car, en termes d'éco-conception, il faut amener toutes les parties prenantes de l'entreprise et ses partenaires à penser globalement. Le gain environnemental obtenu sur un poste peut s'avérer désastreux pour un autre. Fort heureusement, les entreprises disposent de l'outil leur permettant de gérer cette complexité : l'analyse du cycle de vie (ACV). L'ACV est une démarche multicritère permettant de quantifier les différents impacts environnementaux d'un produit : changement climatique, impacts sur les écosystèmes, impacts sur les ressources, impacts sur la santé humaine.

Cette approche scientifique s'appuie sur des bases de données et des méthodes de calcul spécifiques. Elle est aujourd'hui utilisée par des grands groupes de secteurs industriels variés (automobile, chimie, agroalimentaire, électronique, énergie, ameublement, bâtiment, etc.) ainsi que par des PME.

La démarche d'éco-conception est exigeante. Elle impose de mobiliser toutes les parties prenantes de l'entreprise afin de s'assurer que les objectifs sont partagés et que l'accès aux données (matériaux, procédés de fabrication, schéma logistique, scénarios d'usage du produit, etc.) sera facilité. À ce titre, l'implication des fournisseurs, sous-traitants et des départements d'achats en logistique s'avère généralement nécessaire.

En retour, les entreprises engagées dans des démarches d'éco-conception font part de résultats très positifs : renforcement des capacités d'innovation, réduction importantes des impacts environnementaux des étapes « matières premières » et « fin de vie ».

Selon une étude menée en 2008 par la Chambre de commerce de Saint-Étienne, dans une grande majorité des cas (28 sur 30 en l'occurrence), la démarche d'éco-conception a contribué à une augmentation des profits des entreprises concernées. Ils sont fortement liés aux réductions de consommation des matières premières et de l'énergie : abaissement des coûts de revient, réduction de la vulnérabilité aux hausses de prix. En introduisant les bénéfices environnementaux dans leurs arguments de vente, certains se positionnent aussi sur de nouveaux segments. Que demander de plus ?

Les défis organisationnels et tech

Broyats de plastiques issus du traitement d'automobiles avant leur tri.

La collecte sélective a facilité le recyclage des bouteilles en plastique.

Verre brisé provenant des déchets ou des conteneurs de recyclage.

© ARNAUD BOUISSOU/MEDDE

La recherche s'attache à faire évoluer les technologies de tri et à mettre au point de nouveaux processus afin d'obtenir des matières recyclées de meilleure qualité et en plus grande quantité.

L'éco-conception, on l'a vu, est une approche globale et fortement pluridisciplinaire. Elle implique aussi bien les ingénieurs que les designers, les économistes, les sociologues, les responsables du marketing et de la communication que, au premier chef, le management des entreprises. Elle est l'objet de nombreux travaux de recherche, en particulier au sein du réseau EcoSD *(voir encadré page 69)* ou du cluster Creer (Cluster Research : Excellence in Ecodesign & Recycling). Fondé par sept entreprises, il a pour objectif de développer une recherche non concurrentielle dans les domaines de l'éco-conception de produits et du recyclage. En France, et encore plus au niveau international, l'éco-conception ne touche pas tous les produits et n'est pas développée dans tous les secteurs industriels. Les produits conçus pour être facilement recyclables ne sont pas encore légion et, surtout, le marché restera probablement longtemps inondé par des produits d'importation qui n'ont pas eu recours à cette pratique. Il est donc essentiel de continuer à faire évoluer aussi bien le tri, pour le rendre plus sélectif, que les process de transformation. Pour augmenter et régulariser les flux de matière recyclée de qualité, la recherche s'attaque ainsi aux technologies de tri et aux processus de recyclage.

L'enjeu majeur du recyclage est de disposer de matière première recyclée de qualité identique, ou du moins très proche, de celle de la matière initiale. De quoi réaliser des produits à base de matière recyclée qui, du point de vue de la performance, ne se distinguent pas des autres. Nombre de matériaux, comme le verre, les métaux, le papier, le carton…

nologiques

ont bien avancé dans cette voie. Désormais, certains plastiques, en particulier le PET (polyéthylène téréphtalate), s'y sont également mis. Les bouteilles plastiques en PET incorporent aujourd'hui une importante proportion de PET recyclé.

Il reste toutefois de nombreux verrous à débloquer encore pour augmenter et régulariser les flux, pour mesurer et optimiser la qualité de la matière première recyclée, sans compter la mise au point de technologies évolutives capables de s'adapter à des matériaux de plus en plus complexes. L'exemple des bouteilles en PET est à cet égard instructif car il met en évidence les facteurs favorables à ce type de recyclage. Il est en effet possible de les recycler car, d'une part, la collecte est bien organisée. Parce que, ensuite, les bouteilles étant quasiment monomatière, le tri est simplifié et donne donc facilement une matière homogène ; enfin parce que les process sont au point. Tout doit aller dans ce sens.

TRIER LES MATIÈRES ET PRODUITS USAGÉS…

Concernant le tri des plastiques, une équipe de l'Ensam de Chambéry (École nationale supérieure des arts et métiers) en partenariat avec une PME, Tracing Technologies, travaille par exemple sur une technique originale. Le tri optique à l'aide d'un spectroscope, utilisé dans les centres de tri, ne fonctionne en effet pas pour les matériaux sombres. La solution, astucieuse, consiste donc à les caractériser bien en amont, avant même qu'ils soient incorporés dans un produit. L'idée consiste à ajouter au plastique vierge des traceurs en faible concentration pendant la phase de compoundage. Ces traceurs émettent dans des longueurs d'ondes particulières sous excitation via des ultra-violets ou des rayons X. La combinaison de plusieurs traceurs permet ainsi une codification des matériaux et donc leur identification par la caméra pendant la phase de tri rapide. Également dans le domaine du tri des plastiques, le CRITT Matériaux Alsace s'attaque entre autres au problème posé par la multiplication des déchets d'équipements électriques et électroniques *(DEEE, voir page 71)*.

… POUR MIEUX LES SÉPARER…

Autre procédé innovant, celui accompagné par le pôle de compétitivité EMC2. Il s'attaque, lui, au problème brûlant du recyclage des composites. Il s'appuie sur une méthode, la solvolyse, pour séparer les fibres et les résines constituant le matériau composite. La solvolyse est un procédé de recyclage chimique réalisé à partir d'eau portée à haute pression (200 bars) et chauffée à haute température (400 °C). Airbus, notamment, s'intéresse à ce procédé qui constitue une alternative aux solutions actuelles : mise en décharge, broyage ou parfois incinération en cimenterie.

Des solutions tout aussi innovantes se trouvent dans le domaine de l'emballage. Des unités industrielles sont aujourd'hui en capacité de séparer les trois constituants d'une brique de lait ou de jus de fruit – l'aluminium, le carton et le plastique – et de les valoriser individuellement, telles que Georgia Pacific (Eure), STORA ENSO (Espagne) ou PNM (Allemagne).

UN RÉSEAU POUR L'ÉCO-CONCEPTION

Le réseau de chercheurs EcoSD (éco-conception de systèmes durables) regroupe 17 laboratoires de recherche, 9 entreprises et 6 associations. Il vise notamment le développement des compétences des chercheurs français en EcoSD, via une meilleure formation des doctorants. Il s'attache également à la mise au point de méthodes, d'outils et à la création de bases de données qui font aujourd'hui défaut pour maîtriser l'éco-conception. Il travaille enfin à une meilleure structuration des activités de recherche en EcoSD en France, notamment par une spécialisation thématique de ses structures. EcoSD est soutenu par l'ADEME, la direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services et le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

… ET LES TRANSFORMER

Les process de transformation évoluent également. Plastic Omnium a ainsi réalisé une première mondiale avec les pare-chocs en polypropylène (PP) de la récente 208 de Peugeot : ils utilisent un PP recyclé offrant des caractéristiques identiques à celles du matériau vierge et qui, donnée critique pour l'automobile, est donc susceptible d'être peint. Pour y parvenir, l'entreprise a mis au point un procédé objet de plusieurs brevets. Il s'appuie sur un cocktail de PP provenant de différentes sources : véhicules en fin de vie, collecte sélective, DEEE, rebuts de production, etc.

Côté consommateur, l'affichage environnemental des produits joue un important rôle de sensibilisation. Mais un affichage de qualité nécessite un lourd travail en amont. L'État a chargé l'ADEME et l'AFNOR de mettre au point des méthodologies et des outils permettant aux fabricants d'afficher l'impact environnemental de leurs produits. L'ADEME développe une base de données d'inventaires de cycle de vie qui sera d'usage obligatoire pour l'affichage environnemental. L'ADEME dispose déjà de données pour plusieurs catégories de produits. Par exemple, les produits agricoles qui ont fait l'objet d'un programme de recherche avec la profession agricole. Il a abouti à la mise en place de méthodologies pour les produits agricoles ainsi que de bases de données d'inventaire du cycle de vie. Autre exemple de recherche, menée avec la profession des boulangers cette fois : la mise au point d'une méthode d'évaluation environnementale pour leurs produits. Elle a conduit au développement d'un outil qui permet aux professionnels de mesurer, sur le mode de l'autoévaluation, les impacts environnementaux de leurs produits. ■■

PAPIER CARTON

Les petits ruisseaux font les grandes rivières

L'éco-conception est un effort permanent, fait notamment de la succession de petites améliorations. C'est en tout cas ce que suggère l'expérience de la filière papier carton. Noël Mangin est, entre autres, délégué général de Revipap, le groupement français des papetiers utilisateurs de papiers recyclables. Il rappelle que, grâce au recyclage, alors que la consommation mondiale de papier carton a été multipliée par quatre depuis quelques années, la production de pâte à papier a progressé deux fois moins vite. Toutefois, pour aller plus loin en termes de recyclabilité, l'éco-conception a selon lui un rôle important à jouer. Il rappelle que le concepteur, avant de choisir une piste de conception, doit prendre en considération tous les matériaux qui constituent le produit fini. Ainsi, en ce qui concerne les emballages, par exemple, il est tout aussi primordial de s'intéresser, au moment de leur conception, au choix des encres utilisées pour l'impression qu'à celui des colles et autres adhésifs. Certains peuvent en effet avoir un impact négatif en termes de recyclabilité. Beaucoup d'autres petites améliorations sont également susceptibles de procurer des avantages non négligeables au moment du recyclage. Utiliser moins de colle, par exemple, ou limiter l'usage de l'impression. Ou encore simplifier le produit et s'interroger sur l'utilité réelle de certaines fonctionnalités. Ainsi, la fenêtre transparente ménagée sur un emballage carton afin de rendre le produit visible est-elle toujours utile ? Si ce n'est pas le cas, s'en dispenser permet non seulement de s'affranchir de l'usage d'une seconde matière, le plastique qui complique le tri, mais également de celui de colle. Le jeu en vaut la chandelle : *« Tous ces efforts ne sont pas seulement des contraintes, ils ont souvent des retombées économiques positives, que ce soit en générant des économies de matière ou en simplifiant les process »*, souligne Noël Mangin.

© ROLAND BOURGUET/ADEME

Grâce au recyclage, la production de pâte à papier progresse deux fois moins vite que la consommation.

MATÉRIAUX

Solvay recycle les terres rares

En septembre dernier, Solvay (ex-Rhodia) inaugurait deux unités de recyclage des terres rares en France. Afin de diversifier ses sources d'approvisionnement et économiser la ressource, le groupe a développé un procédé pour récupérer les terres rares contenues dans les lampes basse consommation, dans un premier temps, puis dans les batteries ou les aimants. Ce projet a nécessité deux années de recherche et développement, suivies de deux années d'étude d'industrialisation et de choix des sites. Un investissement de plus de 15 millions d'euros !
Les lampes basse consommation sont riches en six terres rares différentes – le lanthane, le cérium, le terbium, l'yttrium, l'europium et le gadolinium. Solvay a désormais la capacité de les recycler en préservant l'intégralité de leurs propriétés d'usage. Les lampes usagées sont collectées, triées et traitées par des sociétés spécialisées qui en valorisent les différents composants (verre, métaux, plastiques, mercure). Les poudres luminophores sont quant à elles transportées vers les usines du groupe. À Saint-Fons (Rhône), le concentré en terres rares en est extrait. Il part ensuite à La Rochelle (Charente-Maritime), site qui détient un savoir-faire unique en Europe en matière de séparation. La poudre y est craquée à haute température avec un réactif dans un four chauffé à 1 000 °C. Les blocs obtenus sont broyés puis remis en suspension, filtrés, lavés et subissent une attaque acide avant de faire l'objet d'une séparation par extraction liquide / liquide dans des batteries de mélangeurs / décanteurs.
Les terres rares sont alors reformulées en précurseurs de luminophores qui seront réutilisés dans la fabrication de lampes nouvelles.

© ROLAND BOURGUET/ADEME

Pas moins de six terres rares dans les lampes basse consommation.

TEXTILE

Les collants Dim, du berceau au berceau

© VASILEV/FOTOLIA.COM

Symbiose, mené par Dim avec la société Integral Vision et un sous-traitant, Epea, est l'un des projets de recherche soutenus par l'ADEME dans le cadre d'un appel à projets de recherche sur l'éco-conception.

Objet du programme : comprendre et mesurer les impacts et les opportunités d'un processus d'éco-conception selon la démarche *Cradle to Cradle*™ (littéralement « du berceau au berceau »), afin de la généraliser dans l'entreprise. Cette démarche entend désigner la recyclabilité complète, le retour de la matière dans le produit d'origine après la fin de vie d'un produit.

La motivation, pour Dim, était tout autant environnementale que marketing : la recherche de différenciation par rapport aux concurrents sur des valeurs environnementales et de bien-être. Dim a fait porter son effort sur un prototype de collant, ainsi que sur un prototype d'emballage. Les leçons de cette recherche sont instructives. D'abord, le projet a été l'origine de nombreuses innovations et en particulier de l'identification de nouveaux matériaux aptes à respecter le concept C2C. Dim a également apprécié la capacité d'une telle approche à mobiliser ses équipes, de la fabrication jusqu'au marketing. L'étude, et c'est tout aussi important, a également permis de déterminer les freins à une telle pratique. D'abord, un circuit de récupération des produits finis non mature et potentiellement responsable de transfert de pollution (CO_2) car très dispersé. Il a également mis en évidence le fait que l'un des composants du collant, l'élasthanne, limite la recyclabilité du produit. Autant de données indispensables à connaître pour évoluer vers le C2C.

ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

Maîtriser le tri des plastiques

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) représentent un flux de déchets particulièrement préoccupant. Il croît au moins deux fois plus vite que les autres. En outre, les objectifs de valorisation fixés par l'Europe sont difficiles à atteindre faute d'une séparation efficace et de solutions de valorisation finale de la fraction plastique. Pour s'attaquer à ce problème, le projet Weeelibs (qui s'inscrit dans le cadre du programme européen Life+), mené par le CRITT Matériaux Alsace (CMA) en partenariat avec l'entreprise IVEA, vise à mettre au point un démonstrateur pour le tri des plastiques des DEEE durant leur démantèlement manuel. Le but est de démontrer que les très nombreuses variétés de plastiques issues des DEEE peuvent être séparées en fractions de polymères homogènes, c'est-à-dire non seulement en fonction de la nature des polymères mais également en fonction des charges et des additifs présents dans les plastiques. De quoi les recycler en une nouvelle matière de qualité et atteindre une valorisation matière supérieure aux limites imposées par la directive DEEE. Le CMA s'appuiera sur son protocole d'identification de polymères développé lors du projet Plastilibs financé par l'ADEME. IVEA fournira pour sa part l'appareil de détection de technologie LIBS (spectroscopie de plasma induit par laser). Cette technologie a été reconnue comme l'une des plus prometteuses pour l'identification des déchets. Elle utilise un tir laser qui génère un plasma à la surface de la matière. Celui-ci émet consécutivement une lumière qui est analysée par un spectromètre.

© IVEA

Appareil LIBS portable pour l'identification des déchets.

Ce cahier spécial a été réalisé avec le soutien de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) : R. Aurret, H. Borrell Puig, Cl. Bergard, B. Clément, A. Geldron ; et du CRITT Matériaux Alsace : P. Pelascini, Cl. Richard.
• **Rédaction :** Franck Barnu • **Conception graphique et réalisation :** A noir (01 48 06 22 22).

Portrait *d'un militant de la valorisation*

Ange Nzihou est né à Dolisie, en république du Congo, en 1966. Après un doctorat en génie des procédés de l'Institut national polytechnique de Toulouse, il intègre en 1998 l'école des mines d'Albi, où il sera nommé professeur en 2005. Il est aussi professeur associé aux universités Columbia et Princeton, aux États-Unis, et Tsinghua, en Chine. Il a fondé en 2010 la revue *Waste and Biomass Valorization*, dont il est le rédacteur en chef.

« Les déchets sont

Plus un matériau est pollué, plus il intéresse Ange Nzihou ! Ce spécialiste du génie des procédés est parvenu à fédérer sa communauté scientifique autour d'enjeux environnementaux.

« Mes camarades me croyaient fils de ministre. Alors que, pour gagner un peu d'argent, je vendais des journaux et distribuais des prospectus très tôt le matin avant d'aller en cours. Un jour, ils m'ont reconnu à un feu rouge. Ils n'en revenaient pas. » Ange Nzihou évoque en souriant ses années difficiles d'étudiant sans le sou.

Le 9 décembre 1987, le jeune homme, bon élève, arrivant tout droit de son Congo natal débarque à Roissy par un froid glacial, avant de gagner Toulouse. Là, il rejoint une école d'ingénieurs en chimie. Sa bourse pour étudier en France mettra deux ans à être versée.

Plus tard, lorsqu'il termine sa thèse à Toulouse, la situation devient ubuesque. Sans papiers français, il ne peut être employé par son laboratoire. Mais s'il ne publie pas dans les revues spécialisées, c'est la mort scientifique assurée. Alors, il travaille bénévolement, « comme un nègre » – une expression qu'il dit assumer parfaitement –, pendant près de trois ans, comptant sur le seul salaire de son épouse française. Il finira par obtenir sa naturalisation et sa place dans le monde de la recherche.

Reconnaissance internationale. Aujourd'hui, il se remémore sans amertume tous les sacrifices consentis sur les sorties ou les loisirs. Ils ont porté leurs fruits : à 46 ans, il dirige le centre de recherche en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement (Rapsodee) associé au CNRS, à l'école des mines d'Albi-Carmaux, dans le Tarn. Il en est, presque à son corps défendant, un des scientifiques les plus en vue. *« Il a eu un parcours scientifique remarquable, entièrement au mérite. En même temps, il a conservé une grande modestie »*, note Béatrice Biscans, directrice du laboratoire de génie chimique de Toulouse, qui a encadré sa thèse. De fait, à l'école des mines, son bureau est vaste mais sans ostentation. Sur les murs, il a accroché des marques de reconnaissance internationale auxquelles il tient beaucoup, mais qu'il a peu médiatisées en France : le Prix présidentiel de l'Agence américaine de la protection de l'environnement, très rarement remis à un étranger, qui lui a été décerné en 2010 ; un document qui atteste sa qualité de membre de l'Académie des sciences pour l'ingénieur de Chine.

Si son accueil est chaleureux, il garde en permanence un ton pondéré et une certaine réserve, qui semblent traduire un souci de ne pas tirer la couverture à lui. Pédagogue, il attaque d'emblée sur le génie des procédés : *« Il y a quinze ans, on faisait dans ce domaine une recherche purement fondamentale. Ainsi, on mettait au point des méthodes de broyage, de séchage, de granulation, etc., sans parler de l'usage final. Pourtant, c'est bien ce qui intéresse le consommateur. J'ai donc décidé de me diriger vers un génie des procédés "orienté produit". Et j'ai souhaité l'appliquer à un domaine qui était alors complètement en friche, celui des déchets et de la biomasse. »*

Ses recherches allient efficacité des produits et sobriété de leur production

Sa carrière était pourtant toute tracée. Lui qui a fait sa thèse... chez Total, sur le thème de la cristallisation de certains hydrocarbures légers, aurait pu faire fortune dans le pétrole, dont le Congo regorge. *« Mais il y avait trop de politique dans le pétrole au Congo. Et il y avait de mon point de vue plus de défis à relever dans le domaine de l'environnement. Comment faire, par exemple, pour produire de l'énergie à partir de biomasse sans entrer en compétition avec des cultures alimentaires ? »*

Vient alors le mot, qu'il martèle tout au long de l'entretien : « valorisation ». Exemple : partir d'un matériau à valeur ajoutée nulle, voire négative, comme des traverses de chemin de fer. Ces dernières sont tellement chargées en métaux lourds (destinés à les rendre imputrescibles) qu'elles constituent un déchet hautement toxique.

sources de richesse »

La solution : les porter à haute température pour gazéifier le bois, ce qui permet de fabriquer des carburants de synthèse, et en extraire les métaux résiduels pour les réutiliser. Les déchets deviennent alors totalement valorisables. *« Les Chinois l'ont compris depuis longtemps,* explique-t-il en souriant. *Ils récupèrent nos déchets et nous revendent les métaux. »*

Approche durable. Son laboratoire travaille aujourd'hui sur deux axes définis par Ange Nzihou selon une approche durable et dans lesquels *« il a été pionnier »*, remarque Béatrice Biscans. D'une part, une recherche en génie des procédés, appliquée notamment à la pharmacie, vise à combiner efficacité des produits et sobriété de leur production. D'autre part, les chercheurs albigeois mettent au point des méthodes de valorisation des déchets et de la biomasse.

Dans ce domaine, le principal fait d'armes de Rapsodee est la mise au point de matrices, poudres ou granulats poreux, à base de phosphates. Dans les processus de dépollution, on utilise habituellement de telles matrices, constituées d'un minéral de la famille des zéolites. Lorsqu'un effluent, gaz ou liquide chargé de métaux lourds, est mis en contact avec ces matrices, les métaux deviennent insolubles, ce qui permet de les extraire. Problème : ces matrices résistent mal aux hautes températures souvent inhérentes aux procédés industriels.

Depuis douze ans, le travail effectué à Rapsodee porte sur des matrices à base de phosphates, plus résistantes à la chaleur. Les chercheurs ont réussi à les adapter au traitement des effluents et à contrôler leurs propriétés [1]. Résultat : elles s'appliquent non seulement aux métaux lourds mais aussi aux composés organiques volatils, issus par exemple de l'industrie pétrolière, et aux résidus d'antibiotiques et de pesticides dans l'eau. À la clé, deux brevets et une activité d'expertise qui rapportent 250 000 euros par an au laboratoire depuis dix ans. Une installation pilote mettant en application ces travaux est désormais en fonction chez l'industriel Solvay, à Nancy, avec qui Ange Nzihou entretient une relation étroite. *« C'est un scientifique à multiples facettes, ce qui* >>>

À la tête de son laboratoire, Ange Nzihou oriente ses recherches vers la valorisation des déchets. Ainsi, il étudie la production d'énergie à partir de biomasse non alimentaire, dont il présente ici un échantillon.

© PHOTOS ROMAIN SAADA/IANDIA

Portrait d'un militant de la valorisation

Ange Nzihou

Son laboratoire

Il dirige le centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement (Rapsodee). Ce laboratoire est divisé en deux départements : « poudres et procédés » et « énergétique et environnement ».

Ses publications

Il est l'auteur de près de 100 publications, portant sur la valorisation de déchets de biomasse ou de sédiments contaminés. Ses recherches visent à mettre au point des procédés pour extraire ces polluants, ou pour les rendre inertes. Il a mis en place des contrats de recherche avec l'industrie (Solvay, Veolia Environnement) et avec des organismes institutionnels, (Ademe, CNRS, etc.).

>>> *est plutôt rare : à la fois professeur, chercheur reconnu et excellent interlocuteur des industriels* », résume Bruno Verlon, qui dirigea l'école des mines d'Albi de 2001 à début 2012. Et écologiste en même temps ? Écolo-pragmatique plutôt. « *Les industriels sont des partenaires obligés pour les solutions environnementales. Si les rendements sont au rendez-vous, ils investiront et créeront des emplois* », souligne Ange Nzihou. Il a ainsi prouvé à Solvay qu'on pouvait utiliser le carbonate de calcium – déchet dont l'industriel possède des milliers de tonnes et ne savait que faire – comme matière première pour fabriquer des matrices à base de phosphates.

Double culture. Cette allergie au gaspillage, il la puise dans ses origines africaines. Il est né à Dolisie, la troisième ville du Congo, d'une mère infirmière et d'un père fonctionnaire féru de littérature. « *Parfois, il n'y avait pas assez à manger à la maison, mais on n'a jamais manqué de livres.* » Camus, Anouilh et les encyclopédies Larousse, dont il passe des heures à contempler les cartes comme autant d'horizons possibles. Il se forgera ainsi une double culture, « *jamais affichée de manière explicite*, précise Bruno Verlon, *faite à la fois d'un attachement au système de recherche occidental et aux écoles des mines, et de valeurs peut-être plus africaines de courage, de pragmatisme et de débrouillardise* ».

Il forme des ingénieurs africains qui resteront sur le continent

Elle lui sert à adopter différents points de vue pour mieux construire des passerelles. Ainsi, il constate que sa communauté scientifique n'est pas assez fédérée et a des difficultés pour publier dans les revues classiques. Qu'à cela ne tienne ! Il conduit un sondage auprès de 5 000 scientifiques, et s'appuie sur ses résultats pour convaincre un éditeur international prestigieux, Springer, de créer une revue scientifique consacrée au sujet. Le premier numéro de *Waste and Biomass Valorization* (« valorisation des déchets et de la biomasse ») est ainsi paru en septembre 2010.

Deuxième pilier de ses « projets qui cassent les frontières » : les conférences internationales *Waste-Eng* (pour *Waste engineering*, « ingénierie des déchets ») dont il lance la première édition en 2005, à Albi. Le succès a dépassé ses espérances, et près de 500 chercheurs du monde entier concernés par la valorisation se retrouvent tous les deux ans dans un pays différent. Il mène ces chantiers en parallèle avec ses activités d'enseignement, à l'école des mines et, périodiquement, dans des universités américaines et chinoises, ainsi qu'avec ses recherches au sein d'une équipe plurielle, la « *Ange Nzihou Research Team* ». Il a importé des États-Unis la pratique selon laquelle un chercheur connu crée une équipe à son nom pour faire bénéficier ses membres de son potentiel d'attraction. Elle mêle jeunes professeurs, ingénieurs et doctorants français et étrangers de partout, et l'adjectif « multiculturel » n'y est pas un mot repoussoir.

Pas de discrimination positive pour autant : le seul facteur de sélection est le mérite. « *Il a su créer un brassage d'idées, un climat humain enrichissant*, explique Moussa Dia, un étudiant mauritanien en troisième année de thèse à Rapsodee. *Et s'il est très exigeant quant à la qualité de nos présentations, il sait aussi nous mettre en valeur en nous permettant de les faire lors des conférences Waste-Eng.* »

Enfin, Ange Nzihou s'investit pour l'Afrique. Notamment dans une initiative pour former des ingénieurs africains de niveau international, mais qui resteront ensuite en Afrique, avec l'Institut national d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, au Burkina Faso. Aurait-il pu viser une carrière politique dans son pays d'origine, tel Cheick Modibo Diarra, l'astrophysicien devenu Premier ministre du Mali ? On le lui a proposé, mais non, il se sent plus utile à l'école des mines d'Albi, d'où il peut organiser un réseau, tisser des liens entre les deux continents, et aussi entre les disciplines.

Ainsi, le dernier en date, qui sera le futur du laboratoire, c'est le couplage solaire-biomasse. « *Les rendements actuels de conversion de la biomasse en biocarburants sont insuffisants. La solution, c'est d'apporter une source d'énergie gratuite et abondante, notamment dans les pays du Sud, celle des rayons du soleil que l'on peut concentrer pour produire de la chaleur* », explique Ange Nzihou. C'est pourquoi Rapsodee s'est associé au laboratoire d'excellence Solstice, piloté par le laboratoire procédés, matériaux et énergie solaire situé sur le site du four solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées-Orientales, afin de produire des dispositifs de valorisation autonomes en énergie. Et c'est encore la double culture d'Ange Nzihou qui transparaît lorsqu'il déclare : « *Le pays qui intégrera réellement les problèmes sociétaux et environnementaux dans le génie des procédés sera gagnant.* » ■ **Jean-François Haït**

[1] C. Verwilghen et al., *Journal of Materials Science*, 42, 6062, 2007 ; S. Baillez et al., *Journal of Hazardous Materials*, 139, 443, 2007. Brevet : Depelsenaire G., Sharrock P., Nzihou A. *Process for treating substances contaminated by heavy metals*. WO 2009/095921 A2, 2008

idées

• **Les livres** p. 87
La sélection de la rédaction de *La Recherche*
• **L'agenda** p. 96
Les conférences, les expositions
• **Curiosités** p. 98
Les insolites de l'actualité scientifique

76 **L'entretien du mois**
avec Dominique Kerouedan
« Je souhaite faire de la santé une question politique »
propos recueillis par Nicolas Chevassus-au-Louis

80 **Déchiffrage**
Des grands patrons à 2,47 millions d'euros
par Hervé Le Bras

81 **Le grand débat**
Faut-il accroître le parc éolien ?
avec Rémi Chabrillat et Jacques Treiner

84 **Question d'éthique**
Les brevets sur les gènes devant la Cour suprême
par Cécile Klingler

86 **L'invité**
Barbara Hendricks
Je ne suis pas scientifique mais...
propos recueillis par Lise Loumé

92 **Histoire de science**
La Lune est-elle fille de la Terre ?
par Marie-Christine de La Souchère

Santé et pays du Sud

Plus de 100 millions de personnes basculeraient chaque année dans la pauvreté et s'endetteraient pour se soigner. Cette situation est surtout critique dans les pays du Sud. Aujourd'hui, l'Organisation mondiale de la santé et la Banque mondiale les encouragent à développer des systèmes d'assurance maladie. Mais lequel choisir ? Seule une analyse des besoins à l'échelle locale et au cas par cas est pertinente. L'Afrique du Sud, terre d'inégalités – un cinquième de la population accède à des soins coûteux de qualité grâce à une assurance privée – s'est donné jusqu'à 2025 pour mettre en œuvre un système public efficace. Elle teste en ce moment une première phase dans 11 districts. Mais les premiers retours d'expérience illustrent la nécessité de former les dirigeants sur ces questions. Une mission à laquelle les pays du Nord pourraient contribuer.

Hélène Le Meur

© ILLUSTRATION REMI MALINGREY

L'entretien du mois

L'aide internationale au développement en matière de santé reflète plus les préoccupations des bailleurs de fonds du Nord que les besoins des pays du Sud. Pour **Dominique Kerouedan,** *il s'agit désormais de travailler ensemble à des stratégies sanitaires internationales efficaces.*

« Je souhaite faire de la santé une question politique »

Dominique Kerouedan est docteur en médecine, docteur en sciences mention épidémiologie et santé publique, et licenciée en droit. Après une longue expérience de terrain dans l'humanitaire et le développement, elle est devenue expert indépendant dans le domaine de l'évaluation des politiques internationales de santé. Elle vient d'être élue professeur au Collège de France pour animer la chaire annuelle « Savoirs contre pauvreté ».

LA RECHERCHE : Vous écriviez récemment que « la santé n'est pas une priorité des politiques d'aide au développement ». Qu'est-ce qui vous conduit à ce constat ?

DOMINIQUE KEROUEDAN : La part de l'aide publique au développement française et européenne consacrée à la santé reste très marginale, autour de 3 % des budgets du Fonds européen de développement, et un peu plus pour la France, derrière les gros postes que sont l'aide budgétaire générale, les infrastructures et les transports. Certes, la décennie 2000 a vu la santé s'inscrire à l'ordre du jour du G8, du Conseil de sécurité, et de l'Assemblée générale des Nations unies, et les financements ont beaucoup augmenté. Mais cet effort ne concerne pas la santé en général : il cible de manière prédominante la lutte contre les maladies infectieuses et en particulier le sida. Il ne porte pas suffisamment sur l'indispensable construction de systèmes de santé performants, ce qui impliquerait des efforts de formation, d'aide aux hôpitaux, de coopération technique, de renforcement de capacités institutionnelles politiques et managériales. L'aide actuelle suit les priorités des bailleurs de fonds, plutôt que celles des pays les plus pauvres du Sud, pour la plupart situés en Afrique.

Quelles seraient ces priorités ?

D.K. Il faut voir la situation au cas par cas, pays par pays, et même affiner l'analyse au sein de chaque pays. On peut cependant souligner deux priorités. La première est la réduction de la mortalité des femmes enceintes, pendant la grossesse ou au moment de l'accouchement, notamment dans les zones rurales. Il existe de fait une sorte d'indifférence à l'égard de la mortalité des femmes enceintes, qui traduit plus généralement un désintérêt pour les jeunes filles ou les femmes. Pour changer les choses, il faudrait aider à la mise en place d'un réseau de médecins et de chirurgiens installés dans des blocs chirurgicaux de premier niveau, permettant d'intervenir en urgence, de faire des césariennes et des transfusions sanguines. La seconde priorité est de faire face à l'envol des pathologies chroniques – hypertension, maladies cardio-vasculaires et respiratoires, cancers et diabète – dans les pays émergents et dans les villes des pays en développement. Le profil épidémiologique des pays émergents du Sud se rapproche de celui des pays du Nord. C'est une réalité que l'on perd de vue en focalisant l'aide sur le sida.

Comment expliquez-vous cette focalisation sur le sida ?

D.K. C'est une histoire qui remonte au milieu des années 1990. Le premier cas de sida en Afrique est notifié à l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en 1985. L'OMS met alors en place un programme dont la stratégie se révèle, dix ans plus tard, limitée pour enrayer la propagation de la pandémie. On découvre alors que 30 % à 40 % des personnes sont contaminées dans certains pays d'Afrique australe. Or, la géopolitique des États-Unis sur le continent africain se concentre précisément sur cette région, et en particulier sur l'Afrique du Sud, l'un des pays les plus touchés. En 1997, un rapport de l'Institute of Medecine considère que les maladies infectieuses sont >>>

© PHOTOS FREDERIQUE PLAS

Dominique Kerouedan

« Je souhaite faire de la santé une question politique »

>>> une menace pour la sécurité nationale des États-Unis. Les Américains notent que les taux de séropositivité sont particulièrement élevés parmi les militaires africains, et redoutent que leurs forces armées, déployées dans le monde entier, connaissent le même problème. Les États-Unis portent alors la question du sida devant le Conseil de sécurité de l'Organisation des Nations unies (ONU) en janvier 2000. C'est la première fois que cette instance traite d'une question sanitaire pensée comme une menace pour la paix et la sécurité. Un an plus tard, une résolution de l'Assemblée générale des Nations unies réclame la création d'un fonds « santé et sida ». C'est ce vote qui va permettre la création en 2002 du Fonds mondial de lutte contre le sida, la tuberculose et le paludisme, ou Global Fund.

Pourquoi est-on passé d'un fonds « santé et sida » à un fonds « sida, tuberculose et paludisme » ?

D.K. Tuberculose et sida sont très intriqués en Afrique. La tuberculose est la première cause de maladie opportuniste qui frappe les malades atteints de sida, alors que dans les pays développés ce sont plutôt des pneumocystoses. Et la lutte contre paludisme reste indéniablement un enjeu majeur. Mais le problème est qu'en se focalisant sur le sida, la tuberculose et le paludisme, on a privilégié les maladies qui intéressent les pays du Nord, en tant qu'ils se sentent menacés. Ainsi, les pays occidentaux décident pour les pays du Sud ce que sont leurs priorités sanitaires. On néglige par exemple la fièvre typhoïde qui fait des ravages chez les enfants, et même chez les adultes. Ou la méningite. Ou, encore, les nombreuses maladies parasitaires qui restent endémiques en zones rurales [1].

Que pensez-vous du Fonds mondial ?

D.K. Le Fonds mondial est en soi une très bonne chose. Les financements sans précédent qu'il a permis de lever – 22 milliards de dollars – sont plus que bienvenus. Et les accusations de gaspillage, de corruption ou de détournement d'argent de ses programmes, si elles sont parfois fondées, ne sont pas le plus important pour estimer les effets de son action. Le problème est que les pays qui bénéficient de ses programmes manquent cruellement de personnels de santé au sens large : pas seulement les soignants, mais aussi des gestionnaires, des administrateurs. Ils ont ainsi beaucoup de mal à suivre les procédures de marché public, juridiquement très compliquées, qui sont exigées pour tout achat de médicaments, de matériel médical, de construction d'infrastructures. De plus, le Fonds fonctionne sur un système d'appel à projets. Y répondre demande un investissement colossal des pays aidés, sans certitude d'obtenir le financement. S'y ajoutent les difficultés d'accès à l'anglais pour les pays francophones. Un autre problème est que le comité d'experts internationaux qui évalue les projets soumis par les pays analyse la conformité technique des interventions proposées mais pas la pertinence stratégique des interventions soumises.

Pourquoi est-ce un problème ?

D.K. Un programme peut être d'excellente qualité, respectant les protocoles médicaux internationaux et les directives de l'OMS, mais ne pas être pertinent par rapport à la situation locale pour combattre le fléau. Par exemple une proposition pour le Mali qui ne cibler ait pas les femmes – alors que le sida y est très majoritairement une maladie de femmes – aurait un impact limité. En Jamaïque, il faut cibler les hommes homosexuels, du fait de très violentes discriminations qu'ils subissent qui les empêchent d'accéder à la prévention et aux soins. Au Vietnam, la toxicomanie par voie intraveineuse est responsable de la majorité des contaminations. Les modes de propagation dominants sont très différents selon les régions, et les projets ne peuvent donc être les mêmes partout.

Le rapport 2012 d'Onusida se félicite de la réduction de 50 % du taux de nouvelles infections par le VIH dans 25 pays du Sud, dont la moitié en Afrique. Est-ce la preuve que la stratégie mise en œuvre par le Fonds mondial est la bonne ?

D.K. Je ne pense pas que nous soyons en mesure de garantir la fiabilité des données. Les méthodes de décompte ne sont pas comparables sur dix ans, car les tests et les méthodes ont changé. De plus, il y a énormément de gens qui ne sont pas dépistés. Même en France, alors que le test est accessible gratuitement, on estime que 30 000 personnes séropositives ignorent l'être. En Afrique, les difficultés d'accès aux soins, géographiques et économiques, sont telles, que les patients fréquentent peu les services de santé, et les malades meurent souvent avant même d'être dépistés et traités. Tout cela échappe aux systèmes d'information sanitaire. Globalement, pour deux personnes mises sous traitement antirétroviral, on compte à l'heure actuelle cinq nouvelles infections par le VIH. Il faut reconnaître que les pays et la communauté

[1] Marc Gentilini et al., *Médecine tropicale*, Lavoisier, 2012.

internationale restent dépassés par la vitesse de propagation de la pandémie de sida, même si la mortalité des patients qui ont la chance de bénéficier des traitements a diminué.

Comment expliquez-vous l'incapacité à enrayer la progression de la pandémie ?

D.K. Le gros problème est que l'on ne reconnaît pas les limites, depuis trois décennies, des politiques de prévention de la transmission sexuelle, sanguine et maternelle du VIH. On cherche à augmenter les moyens, mais c'est surtout un problème de pertinence des stratégies. Les campagnes d'information tout-venant n'ont que peu d'influence sur les comportements tels que l'utilisation de préservatifs ou la réduction du nombre de partenaires sexuels. Ce qui marche, ce sont des interventions en amont sur les déterminants de la propagation et des actions plus ciblées, individuelles ou en petit groupe, par exemple à l'occasion d'un dépistage. Il faut cibler les jeunes et les groupes à risque : notamment les prostituées, les militaires, les camionneurs (parce qu'ils voyagent beaucoup et disséminent ainsi la maladie), ou encore les hommes ayant des relations homosexuelles, et les usagers de drogues, encore trop ignorés en Afrique.

Qu'est-ce qui ralentit les progrès en santé ?

D.K. Ce n'est pas seulement une question d'argent. Les populations sont réticentes à fréquenter les centres de soin : au plus 0,3 à 0,4 consultation par an et par habitant dans certains endroits en Afrique. Les malades pratiquent l'automédication, ou recourent à des personnes de leurs familles, du village ou des tradipraticiens. La consultation d'un médecin, et plus encore une visite à l'hôpital, est un dernier recours, aussi, mais pas seulement, parce qu'il est très coûteux.

Comment faciliter l'accès des populations aux centres de soin ?

D.K. Le principal frein est financier. En 1987, l'initiative de Bamako, une déclaration des ministres de la Santé africains appuyée par l'OMS et la Banque mondiale, avait posé le principe de la tarification de tous les actes de soin. En faisant payer les patients, on visait à dégager ainsi dans chaque pays de nouvelles ressources pour le fonctionnement du système de santé, qui devaient financer son amélioration. Quinze ans plus tard, l'initiative de Bamako s'est révélée générer des iniquités. On estime que plus de 100 millions de personnes basculent chaque année dans la pauvreté parce qu'elles s'endettent pour payer les soins. Aujourd'hui, l'OMS et la Banque mondiale encouragent les États du Sud à développer des systèmes d'assurance-maladie et de protection sociale.

Chaque année, plus de 100 millions de personnes s'endettent pour payer leurs soins

La chaire que vous occupez pendant un an au Collège de France s'intitule « Savoirs contre pauvreté ». De quels types de savoirs nouveaux, donc de recherche, avons-nous besoin pour traiter des questions de santé dans les pays en développement ?

D.K. J'aimerais voir une étude aboutir sur l'adéquation entre les priorités objectives de santé et la répartition de l'aide au développement, c'est-à-dire entre les moyens et l'importance réelle des maladies en termes épidémiologique et économique. Il faudrait faire des analyses par pays de la situation sanitaire et de ses déterminants, puis les mettre en perspective de l'allocation publique et privée de l'aide mondiale. Une bonne adéquation contribuerait certainement à une meilleure efficacité de l'aide sur le terrain.

Et sur le plan médical ? Y a-t-il besoin de nouveaux savoirs ?

D.K. On ne manque globalement pas de savoirs techniques, médicaux. Il y a certes un besoin urgent de vaccins contre le sida et contre le paludisme, et de nouveaux médicaments. Mais il ne faut pas croire qu'ils pourraient tout résoudre. Le vaccin contre la rougeole existe, mais cette maladie fait toujours des ravages. Ce qu'il faut, ce sont des savoirs d'anthropologie, de sociologie, à l'écoute des populations, pour savoir comment la technologie disponible peut mieux les protéger. Les autorités sanitaires de ces pays ont aussi besoin de connaître quelles sont les interventions efficaces au plus bas prix, donc de recherche unissant des économistes et des spécialistes de l'évaluation des programmes de santé. C'est crucial pour convaincre les dirigeants politiques des pays du Sud, qui ont besoin de savoir à la fois ce qui marche et ce qui coûte le moins cher. C'est pourquoi il faudrait aussi développer des formations *in situ* des futurs dirigeants politiques, pour qu'ils soient sensibilisés aux questions de santé. Les questions de santé sont toujours vues par les décideurs à travers la médecine. Mais la médecine n'est qu'un tout petit champ de la santé. Je veux sortir la santé de la profession médicale, et en faire une question politique sur laquelle les dirigeants s'engagent.

■ **Propos recueillis par Nicolas Chevassus-au-Louis**

Pour en savoir plus

> D. Kerouedan, *Field Actions Science Reports*, 2012, numéro spécial en ligne n° 4.

> D. Kerouedan (dir.), *Santé internationale. Les enjeux de santé au Sud*, Les Presses de Sciences-Po, 2011.

> **http://factsreports.revues.org/1238**

Déchiffrage

Des grands patrons à **2,47 millions** d'euros

Le salaire exorbitant des dirigeants des grandes entreprises françaises n'est corrélé ni avec la réussite ni avec les bénéfices de leurs sociétés.

Par **Hervé Le Bras,** démographe, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales.

Le salaire annuel moyen des dirigeants du CAC 40 – indice boursier moyen des grandes entreprises de la place de Paris – s'est élevé à 2,47 millions d'euros en 2011. Le salaire moyen en France est de 18 000 euros, soit 137 fois moins. Un tel écart demande justification. Trois raisons sont mises en avant pour expliquer les émoluments des dirigeants de ces grandes entreprises : leur action a permis à leurs sociétés de faire des bénéfices dont ils touchent une juste part, deuxièmement ils prennent des risques, troisièmement, ils créent de l'emploi. Chacune de ces raisons mérite discussion.

Spécificité française. Le magazine *Challenges*, peu susceptible de vilipender les cadres dirigeants, a publié deux statistiques, celle de la croissance du salaire des dirigeants des entreprises du CAC 40 entre 2010 et 2011 et celle de la croissance du bénéfice de leurs entreprises sur la même période. Une comparaison entre les deux séries est indépendante de la taille de l'entreprise et du salaire de son dirigeant puisqu'il s'agit de l'évolution entre deux années successives. Le résultat, reporté sur la figure ci-contre avec, en abscisse, la croissance du bénéfice de l'entreprise et, en ordonnée, la croissance du salaire de son dirigeant, montre qu'il n'y a aucune relation entre les deux. Le coefficient de corrélation est de 0,04, soit absolument non significatif. Ce n'est pas une fatalité de l'économie de marché, mais une spécificité française ; Steven Kaplan, économiste à l'université de Chicago, trouve au contraire une corrélation positive dans le cas des cent plus grandes entreprises américaines. Puisqu'en France la première raison ne tient pas la route, qu'en est-il des deux autres ?

L'ÉVOLUTION DES RÉMUNÉRATIONS des dirigeants de dix grandes entreprises françaises entre 2010 et 2011 (ordonnée) n'est pas corrélée avec celle de leurs bénéfices (abscisse).

La deuxième raison prend en considération la prise de risques par le dirigeant. En fait, le risque est pris par les capitalistes, ceux qui possèdent le capital de l'entreprise, donc, en général, les actionnaires. Le dirigeant est au contraire à l'abri des risques, plus à l'abri que ses salariés, car il a, le plus souvent, obtenu des primes d'entrée, des retraites chapeaux et des parachutes dorés, qui le mettent à l'abri du besoin jusqu'à la fin de ses jours.

Qui prend les risques ? Paradoxalement, la forte somme gagnée par un actionnaire important est plus légitime en économie de marché que le fort salaire du dirigeant, qui ne risque que sa réputation. Puisque le dirigeant ne prend pas de risque personnel, son salaire n'est donc pas justifié par cette deuxième raison.

Reste l'emploi. Le bilan est difficile à faire du fait de l'éclatement des grandes sociétés en de multiples entreprises. Cependant, une première estimation établie à partir des rapports annuels des entreprises du CAC 40 aboutit aussi à une absence de corrélation entre la progression des salaires des dirigeants et celle du volume de l'emploi, ce qui va de pair avec l'absence de corrélation concernant la croissance du bénéfice.

Aucune des trois raisons avancées pour l'importance des salaires des dirigeants des plus grandes entreprises ne résiste à l'analyse. Dans la mesure où ces salaires ne représentent qu'une faible part de la masse salariale de l'entreprise, cela ne porte guère à conséquence économique. Mais le symbole est dévastateur, car l'indignation du salarié moyen face à ces énormes rémunérations se reporte sur tous les patrons, y compris ceux des PME, dont les salaires n'ont en général rien de démesuré, bien qu'ils risquent souvent leur propre capital et créent de l'emploi. Les excès de la cour de Versailles ont rejailli sur toute la noblesse, ceux des dirigeants du CAC 40 rejaillissent sur tout le patronat. ■

© SCIENCE - CHALLENGES, N° 300, 10-05-2011

D'après un rapport publié fin novembre 2012, la part de l'énergie éolienne devrait être multipliée par dix d'ici à 2050, en France. Dans le contexte de débat national sur la transition énergétique qui se tiendra jusqu'en juin 2013, ce document relance les discussions entre les pro- et les antiéoliens.

Faut-il accroître ***le parc éolien ?***

Les éoliennes sont dans le vent : chaque année depuis dix ans, leur capacité de production en électricité augmente de 28 % en moyenne dans le monde. En France, 4 500 éoliennes sont sorties de terre depuis 1991, représentant une capacité de production de 7,2 gigawatts, de quoi fournir 2,5 % de la consommation électrique annuelle. Néanmoins, ce niveau est encore bien éloigné des objectifs nationaux.

Le 23 janvier 2008, la France s'est en effet engagée auprès de l'Europe à produire, d'ici à 2020, 20 % de son électricité avec des énergies renouvelables. Concrètement, pour l'éolien, il s'agit d'atteindre 25 gigawatts en 2020, dont 19 gigawatts produits à terre et 6 gigawatts en mer. Sachant qu'une éolienne terrestre produit en moyenne 2,5 mégawatts, cela signifie qu'il faudrait au minimum doubler le parc éolien terrestre actuel et installer en mer plus de 1 000 éoliennes. De quoi susciter des discussions, notamment dans le contexte du débat national sur la transition énergétique.

Dans un rapport rendu public le 8 novembre 2012, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) enfonce le clou : elle avance que, d'ici à 2030, la capacité de production électrique de l'éolien terrestre en France pourrait rejoindre le niveau actuel de l'Allemagne, à savoir 34 gigawatts. L'éolien en mer, lui, atteindrait 12 gigawatts. Cette tendance s'accentuerait à l'horizon 2050, les éoliens terrestres et marines atteignant, respectivement, 40 gigawatts et 30 gigawatts. Rémi Chabrillat, de l'Ademe, explique pourquoi ce développement est important. Pour Jacques Treiner, membre du collectif « Sauvons le climat », choisir l'énergie éolienne revient, au contraire, à augmenter in fine *les émissions de gaz à effet de serre.* ■ **Viviane Thivent**

Rémi Chabrillat est ingénieur de formation et directeur productions et énergies durables à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

Jacques Treiner a été physicien théoricien à l'université Pierre-et-Marie-Curie. Il est membre du collectif « Sauvons le climat » qui, face au changement climatique, préconise l'économie des ressources et le développement des énergies nucléaire et renouvelable.

Les grandes dates

1888
L'Américain Charles F. Brush construit la première éolienne produisant du courant électrique.

1890
Le Danois Poul La Cour met au point la première éolienne « industrielle », permettant de générer de l'électricité.

1971
Premier parc éolien en mer au large du Danemark pour une puissance totale de 5 mégawatts.

1991
Premières éoliennes industrielles en France installées à Port-La-Nouvelle, dans l'Aude.

2012
Le gouvernement français lance un appel d'offres pour construire ses premières éoliennes marines à partir de 2015.

© CHEICK SAIDOU/MAXPPP, AGRI. FR - DR

Le grand débat

Faut-il accroître le parc éolien ?

« L'éolien fait appel à une ressource gratuite

Rémi Chabrillat

Il faut développer le parc éolien, d'abord parce que la France possède, après les îles Britanniques et les pays nordiques, l'un des premiers gisements en vent d'Europe. L'Agence européenne de l'environnement estime ce potentiel à 576 térawattheures sur terre. À titre de comparaison, la France consomme environ 500 térawattheures d'électricité par an. Les trois régimes de vents français (Atlantique, Méditerranée, Manche) ne sont pas reliés les uns aux autres et soufflent davantage en hiver, quand la demande énergétique est la plus forte. Le bilan établi par le Réseau de transport d'électricité (RTE) montre ainsi qu'en décembre 2011 l'éolien a couvert 4,2 % de la consommation électrique, contre 2,5 % en moyenne sur l'année.

Selon le même rapport, l'accroissement des productions éolienne et photovoltaïque a réduit le recours aux centrales thermiques et a participé à la baisse de 19,8 % observée en 2011 des émissions en dioxyde de carbone du parc de production d'électricité français.

Énergie compétitive. Ensuite, d'un point de vue économique, l'énergie éolienne devient presque compétitive. En France, le prix d'achat de l'éolien est fixé par décret : il est de 82 € par mégawattheure pendant les dix ans suivant l'installation de l'éolienne, puis de 82 à 28 € pour les cinq années suivantes. Le prix d'achat moyen de l'électricité sur la durée de vie d'une éolienne est donc de l'ordre de 70 € le mégawattheure ; il est proche du prix de gros de l'électricité, évalué en 2010 à environ 55 € le mégawattheure en base et à 70 € le mégawattheure en pointe – électricité revendue aux particuliers autour de 110 € le mégawattheure. À titre de comparaison, la Cour des comptes évalue, dans un rapport publié en 2012, le coût de production du nucléaire actuel à 49,50 € le mégawattheure ; un coût qui s'élèvera, toujours selon ce rapport, pour les futures installations de type EPR, et qui se situerait au minimum entre 70 et 90 € le mégawattheure. L'éolien se situe donc dans le bon ordre de grandeur

« Le développement de l'éolien s'accompagne

Jacques Treiner

Tout dépend du scénario énergétique auquel l'éolien vient contribuer. Car l'énergie éolienne, inépuisable, non émettrice de gaz à effet de serre dans son fonctionnement et décentralisée dans sa collecte, est intermittente.

L'intermittence est liée aux variations de la vitesse du vent, qui peuvent être extrêmement brusques. Or, l'énergie produite, qui varie comme le cube de la vitesse du vent, est quasi nulle à faible régime de vent ; à fort régime de vent, l'éolienne doit être mise en berne à cause des contraintes mécaniques sur les structures. En conséquence, un watt installé (théorique) n'est pas un watt effectif : en moyenne, la puissance délivrée est de l'ordre de 20 % de la puissance installée. Ce facteur passe à environ 30 % pour les éoliennes de mer. De plus, le fonctionnement des réseaux électriques exige que l'offre équilibre à tout instant la demande, sous peine de délestage, voire de panne totale. Que se passe-t-il alors lorsque le vent cesse pendant un jour ou une semaine, comme cela peut être le cas en régime anticyclonique où la pression est stable ? Pour pallier ces fluctuations qui peuvent être de l'ordre de grandeur de la puissance installée, il faut de la puissance de réserve, facilement mobilisable. L'extension des parcs à l'échelle d'une région, voire de l'Europe entière, ne permet pas de compenser l'intermittence.

L'extension des parcs à l'échelle d'une région, voire de l'Europe entière, ne permet pas de compenser l'intermittence

Une étude de « Sauvons le climat » montre que les régimes de vent sont reliés sur des distances de l'ordre du millier de kilomètres, et les effets de foisonnement (« il y a toujours du vent quelque part ») ne sont pas

et ne génère pas d'émissions polluantes »

économique. Mieux : alors que le prix de l'électricité est orienté à la hausse en Europe et en France, les coûts de production de l'éolien ont baissé et devraient continuer à le faire. Dans un rapport publié en 2012, l'Agence internationale des énergies renouvelables évoque des hypothèses de baisse de 15 % d'ici à 2020. Reste la question de l'intermittence. Le fait que les éoliennes ne produisent pas d'énergie en continu n'est pas rédhibitoire. En effet, un parc plus étoffé permet une compensation sur le réseau entre les éoliennes qui tournent et celles qui sont à l'arrêt. Et ce d'autant mieux que le gestionnaire du réseau est capable de prévoir les évolutions de production de son parc comme il anticipe les évolutions des consommations, ce qui est d'ores et déjà réalisable. Le gestionnaire du réseau français, RTE, indique dans une synthèse publique de 2010 : « *Il est possible de prévoir vent et production éolienne à l'échelle de régions et du pays entier avec une précision suffisante de plusieurs heures, voire de plusieurs jours à l'avance.* » En outre, dans les années à venir, la qualité des prévisions va s'améliorer. De nouvelles méthodes de stockage de l'énergie ou des réseaux dits « intelligents », aptes à mieux gérer les fluctuations de la production et de la consommation électriques, se développeront. Autant de facteurs qui viendront parfaire l'intégration des éoliennes dans le réseau.

Alors que le prix de l'électricité est orienté à la hausse en Europe et en France, les coûts de production de l'éolien ont baissé

Une intégration que nous appelons de nos vœux : rappelons-le, l'éolien recourt à une ressource gratuite et inépuisable ; il ne génère pas d'émissions polluantes, ni de déchets, ne consomme pas d'eau. Son impact essentiel est sa visibilité dans le paysage ; cet impact, qui ne doit pas être minimisé, est réversible et doit être comparé aux impacts des autres sources de production d'électricité. Toutes en ont. ■

forcément de celui de centrales à gaz »

au rendez-vous. La source réelle n'est donc pas l'éolien seul, mais l'ensemble énergie éolienne plus énergie de réserve.

Stockage insuffisant. Tant que la puissance à réguler est faible, l'énergie hydraulique peut suffire comme réserve. Mais dans le cas d'un développement massif de l'éolien, en l'absence de capacités de stockage de l'énergie à la hauteur nécessaire, la forme la plus souple de réserve est le gaz. C'est pourquoi le développement de l'éolien s'accompagne de celui de centrales à gaz. En France, où 90 % de l'électricité est produite sans émissions de gaz à effet de serre, un développement massif de l'éolien s'accompagnerait paradoxalement d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre associées à cette production électrique.

Quid du coût ? Les tarifs d'achat par EDF (répercutés en partie sur les consommateurs) de l'électricité éolienne produite à terre sont de 82 € le mégawattheure, et, d'après les derniers appels d'offres, de 230 € le mégawattheure pour celle produite en mer. Cela ne prend pas en compte le coût des centrales thermiques devant servir de réserve, ni la construction des lignes à haute tension pour raccorder au réseau ni le temps de vie des installations estimé de 20 à 25 ans. Par comparaison, l'EPR doit produire le mégawattheure à un coût, évalué par la Cour des comptes, entre 70 et 90 €, et il est construit pour durer soixante ans.

Un développement important de l'éolien en France n'est donc pas justifié. Il y a mieux à faire, surtout du côté de l'isolation des bâtiments, du développement de la chaleur renouvelable (chaleur solaire, biomasse, géothermie) et de l'électrification d'un certain nombre d'usages (pompes à chaleur, transport). En Allemagne ou au Danemark, premiers émetteurs de gaz à effet de serre par habitant en Europe, ce choix est mieux justifié, mais les problèmes soulignés ici ne cesseront de s'amplifier. En moyenne, un kilowattheure produit en France émet huit fois moins de dioxyde de carbone qu'en Allemagne. Tirons parti de cet atout, plutôt que de travailler à le réduire. ■

Question d'éthique

Les brevets de la société Myriad Genetics couvrant deux gènes impliqués dans les cancers du sein héréditaires sont-ils valides ? La Cour suprême des États-Unis se prononcera d'ici à quelques mois.

Les **brevets sur les gènes** devant la Cour suprême

Cécile Klingler, journaliste à *La Recherche*.

Les gènes sont-ils brevetables en tant que tels ? La question n'est pas nouvelle. Mais cette année, c'est la plus haute instance juridique des États-Unis, la Cour suprême, qui va se prononcer. Le 30 novembre 2012, elle a en effet annoncé qu'elle examinerait la requête déposée en ce sens par une société savante, l'Association for Molecular Pathology, et plusieurs autres plaignants rassemblés derrière l'Union américaine pour les libertés civiles. Elle devrait rendre son avis d'ici à fin juin.

Il s'agit là du plus récent épisode d'un feuilleton juridique qui a débuté il y a des années. Il oppose les plaignants déjà mentionnés à la société Myriad Genetics, à l'université de l'Utah et à l'Office américain des brevets. Au cœur de l'affaire, se trouvent plusieurs brevets détenus par Myriad et l'université de l'Utah. Ils couvrent des méthodes de diagnostic de mutations impliquées dans les cancers héréditaires du sein et de l'ovaire, ainsi que la séquence des deux gènes, *BRCA1* et *BRCA2*, concernés par ces mutations. Problème : ces brevets sur les gènes et la façon dont Myriad exerce ses droits dessus placent cette société en situation de monopole dans le domaine du dépistage des cancers du sein héréditaires (environ 5 % des cancers du sein).

Décision invalidée. Saisie du dossier en 2009, la Cour du district sud de New York s'est prononcée le 29 mars 2010. Son verdict a fait l'effet d'un coup de tonnerre, dans un pays où les brevets couvrant la séquence d'un gène sont monnaie courante depuis trente ans. Par la voix du juge Robert Sweet, elle a en effet estimé que la séquence des gènes était, en tant que telle, non brevetable ! Myriad a alors fait appel de cette décision devant la cour d'appel fédérale. Le 29 juillet 2011, celle-ci a invalidé la décision du juge Sweet. Des trois juges appelés à trancher deux ont en effet considéré qu'un fragment d'ADN isolé, donc sorti du contexte chromosomique qui est le sien dans la nature, peut faire l'objet d'un brevet.

Fin de l'histoire ? Non car, en mars 2012, la Cour suprême a demandé à la cour d'appel de reconsidérer son jugement, à la lumière d'une autre affaire sur laquelle elle venait de statuer, concernant un brevet de la société Prometheus. Ce brevet couvrait une méthode consistant à ajuster précisément la dose d'un médicament vendu par Prometheus, pour obtenir l'efficacité requise en évitant des effets secondaires. La Cour suprême a estimé qu'un tel ajustement revenait à suivre une « loi de la nature », et que le simple fait de l'intégrer dans une méthode d'optimisation d'un traitement ne suffisait pas à en faire une invention brevetable.

Deux voix contre une. Cette référence aux lois de la nature allait-elle modifier l'avis de la cour d'appel concernant les brevets de Myriad ? Le 16 août 2012, elle a confirmé son jugement initial, toujours par deux voix contre une : une séquence d'ADN isolée est brevetable, car elle n'est qu'une fraction de la molécule d'ADN qu'on trouve dans la nature, et son obtention nécessite une intervention humaine. Face à ce jugement, l'Association for Molecular Pathology s'est alors tournée vers la Cour suprême. Laquelle va donc examiner si les gènes remplissent effectivement les conditions requises pour faire l'objet d'un brevet.

Que se passera-t-il si elle répond par la négative ? De l'avis de plusieurs observateurs, la conséquence pourrait bien être de relancer le débat sur la distinction entre invention et découverte, beaucoup plus floue en droit américain qu'en droit européen. D'ici à ce que le législateur – soit le Congrès – décide de se saisir de la question, il n'y a qu'un pas. Un pas qui, cette fois, pourrait sceller définitivement la controverse, au moins sur le plan juridique. ■

Avec les avis de

http://tinyurl.com/Myriad-Jugement-16-aout-2012
Le jugement de la cour d'appel fédérale du 16 août 2012.

http://tinyurl.com/Requete-Cour-Supreme-2012
La requête déposée par l'Association for Molecular Pathology et les autres plaignants devant la Cour suprême des États-Unis.

http://tinyurl.com/USPTO-overview-article-101
Sur le site de l'Office américain des brevets, un rappel des critères de brevetabilité.

Complétez votre collection...

La Recherche
L'actualité des sciences

Les anciens numéros

Année 2011

N° 449 février 2011
Dossier : Comment le cerveau apprend.
Événement : la pêche menace-t-elle le thon rouge ?

N° 450 mars 2011
Dossier : La traque de l'antimatière.
Événement : dernier repas chez les ammonites.

N° 451 avril 2011
Dossier : Cellules souches, les promesses de la médecine régénératrice.
Événement : gaz de schiste, une exploitation à risque.

N° 452 mai 2011
Dossier : Mars, sur les traces de la vie
Événement : Le nucléaire civil après Fukushima.

N° 453 juin 2011
Dossier : Nucléaire et risques naturels, l'état des lieux en France.
Événement : Première usine française pour les nanotubes.

N° 454 juillet-août 2011
Dossier : Sommeil et rêves, ce que révèlent les neurosciences.
Événement : Les antirétroviraux limitent la transmission du sida.

N° 455 septembre 2011
Dossier : Un nouveau monde quantique.
Événement : Des organes passent sous contrôle lumineux.

N° 456 octobre 2011
Dossier : Origines de la vie.
Événement : Immuniser des moustiques pour éradiquer la dengue.

N° 457 novembre 2011
Dossier : Le développement de l'intelligence.
Événement : Des neutrinos supra-luminiques interrogent la physique.

N° 458 décembre 2011
Dossier : Vers une gravitation quantique.
Événement : Toucher par la pensée.

Année 2012

N° 459 janvier 2012
Dossier : Le cœur artificiel.
Événement : Le lac sous-glaciaire Vostok bientôt atteint.

N° 460 février 2012
SPÉCIAL : Les 10 découvertes de l'année.

N° 461 février 2012
Dossier : La physique de l'invisible.
Événement : Les mystérieuses origines des fossiles de Doushanto.

N° 462 mars 2012
Dossier : Vaincre la douleur.
Événement : Stradivarius, la fin du mythe.

N° 463 avril 2012
Dossier : Épigénétique, l'hérédité au-delà des gènes.
Événement : Controverse autour d'un « supervirus » de la grippe.

N° 464 mai 2012
Dossier : La théorie de la complexité.
Événement : Fertilité, les cellules souches bien cachées.

N° 465 juin 2012
Dossier : Troubles mentaux, l'escroquerie.
Événement : Taux d'acidification record pour les océans.

N° 466 juillet-août 2012
SPÉCIAL : La physique du XXIe siècle.
Événement : La saga de la grotte Chauvet.

N° 467 septembre 2012
Dossier : Comment Internet modèle notre cerveau.

N° 468 octobre 2012
Dossier : Les nouvelles voies de l'immunité.

N° 469 novembre 2012
Dossier : Boson de Higgs : Le pari gagné des physiciens.

N° 470 décembre 2012
Dossier : OGM : vérités & mensonges

Les hors-série

- La physique en 18 mots-clés
- Les sciences de la Terre en 18 mots-clés
- 365 énigmes mathématiques
- Spécial Jeux mathématiques
- Le Guide de l'emploi scientifique

Les numéros exceptionnels

- Jeux mathématiques
- La science en 22 mots-clés

Les années complètes

-8% d'économie

2002 : N° 349 à 359
2003 : N° 360 à 370
2004 : N° 371 à 381
2005 : N° 382 à 392
2006 : N° 393 à 403
2007 : N° 404 à 414
2008 : N° 415 à 425
2009 : N° 426 à 436
2010 : N° 437 à 447
2011 : N° 448 à 458

Les Dossiers de La Recherche

Année 2008
N° 30 : La conscience
N° 31 : Le défi climatique
N° 32 : La nouvelle histoire de l'homme
N° 33 : L'héritage Darwin

Année 2009
N° 34 : L'intelligence
N° 35 : Le Big Bang
N° 36 : La mer
N° 37 : Le pouvoir des mathématiques

Année 2010
N° 38 : La lumière quantique
N° 39 : La valse des espèces
N° 40 : Le cerveau
N° 41 : Microbes **NOUVELLE FORMULE**

Année 2011
N° 42 : L'héritage Marie Curie
N° 43 : La théorie du tout
N° 44 : Les idées reçues en science et en technologie
N° 45 : Neandertal, notre nouvel ancêtre
N° 46 : La révolution des mathématiques

Année 2012
N° 47 : Les énergies de demain
N° 48 : Dieu et la science
N° 49 : La mémoire
N° 50 : Les plus belles énigmes de la science
N° 51 : Les pôles, enjeu planétaire

Retrouver l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.larecherche.fr et les commander en ligne.

Et pour conserver votre collection précieusement

- **l'écrin 12 numéros**
  24€ les deux
- **l'écrin 18 numéros**
  (12 numéros + les 6 Dossiers de la Recherche)
  27€ les deux

Tarifs (frais de port compris)	France TTC	Étranger TTC
Année complète 11 nos	45 €	55 €
Numéros	7,50 €	8,50 €
Dossiers	8 €	9 €
Hors-série	6,50 €	7,50 €
Numéros exceptionnels	8 €	9 €
Écrin 12 nos	13,50 €	16,50 €
Lot de 2 écrins 12 nos	24 €	27 €
Écrin 18 nos	15 €	18 €
Lot de 2 écrins 18 nos	27 €	30 €

Oui, je souhaite recevoir dans les 3 semaines :

Quantité	Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	
	Années complètes : ☐ 2002 ☐ 2003 ☐ 2004 ☐ 2005 ☐ 2006 ☐ 2007 ☐ 2008 ☐ 2009 ☐ 2010 ☐ 2011	Soit ____ €
	Numéro ____	Soit ____ €
	Dossiers N° : ____	Soit ____ €
	■ La physique en 18 mots-clés	Soit ____ €
	■ Les sciences de la Terre en 18 mots-clés	Soit ____ €
	■ 365 énigmes mathématiques	Soit ____ €
	■ Spécial Jeux mathématiques	Soit ____ €
	■ Le Guide de l'emploi scientifique	Soit ____ €
	■ Jeux mathématiques	Soit ____ €
	■ La science en 22 mots-clés	Soit ____ €
	Écrin 12 nos : ____ Lot de 2 : ____	Soit ____ €
	Écrin 18 nos : ____ Lot de 2 : ____	Soit ____ €
	Total de ma commande	____ €

Bon de commande

À retourner à LA RECHERCHE - BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux
✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 • Fax : 33 (0) 2 38 34 32 23 ✉ Email : ctartivot@wanadoo.fr

V 472

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____
Pays : _____
E-mail : _____

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *La Recherche* ❒ carte bancaire

N° _____ _____ _____ _____

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : _____ Expire fin : _____

Signature obligatoire :

Votre commande ne sera expédiée qu'à réception de votre règlement.

Je ne suis pas **scientifique** *mais...*

Barbara Hendricks,

63 ans, est une artiste lyrique née aux États-Unis. Avant de débuter sa carrière d'artiste, elle a étudié les sciences à l'université. Depuis 1987, elle est ambassadrice du Haut-Commissariat des Nations unies pour les réfugiés. En avril, elle effectuera une tournée en France.

Enfant, j'étais déjà passionnée par les mathématiques. Résoudre des équations est tout aussi captivant que trouver le coupable d'un crime avant la fin d'un roman policier. Je suis d'ailleurs convaincue qu'étudier les mathématiques m'a permis de structurer mon raisonnement, ce qui m'aide au quotidien dans ma carrière de chanteuse. Par exemple, pour apprendre par cœur une partition de musique contemporaine. Au lieu de tenter de retenir les notes une par une dans l'ordre de la partition, je repère les répétitions et les variations élaborées par le compositeur. De même pour les paroles, plus difficiles à mémoriser quand elles sont dans une langue étrangère.

La patience des chimistes m'impressionne. Plus d'une fois j'ai raté une expérience à l'école en ajoutant trop de réactifs, simplement pour voir la solution changer plus rapidement de couleur.

Sensible aux droits des réfugiés, je pense qu'il y a urgence à uniformiser les diplômes entre les pays : il est aberrant qu'aujourd'hui encore des chercheurs de talent ne puissent exercer leur profession dans leur pays d'accueil, alors que l'on a besoin de leurs compétences.

J'ai essayé de transmettre le goût des sciences à mes enfants, qui croyaient que seul l'apprentissage de l'informatique leur serait utile.

Il fallait se battre pour aller à l'école dans les années 1960, à l'époque de la ségrégation raciale aux États-Unis, dans un monde complexe et angoissant. C'est cette complexité que je souhaitais comprendre et qui m'a incitée à étudier les sciences et à me poser des questions. Pourquoi l'Univers est-il tel qu'il est aujourd'hui ? Pour y répondre, les physiciens tentent de remonter le temps jusqu'au Big Bang. Ils s'efforcent d'expliquer l'ensemble des phénomènes observés à toutes les échelles, en proposant des lois d'unification, comme la théorie des cordes, qui cherche à réconcilier la mécanique quantique et la relativité générale, qui me fascine.

■ **Propos recueillis par Lise Loumé**

© BRUNO LEVESQUE/GLOBEPIX

le livre du mois

D'une philosophie à l'autre

Bruno Karsenti

« *La philosophie a quelque peine à entrer dans le carcan d'une discipline et à demeurer à la place que la division du travail intellectuel lui réserve. À cela, il arrive qu'on donne de mauvaises raisons : l'orgueil, la légèreté ou le sentiment de toute-puissance du fameux "spécialiste des généralités". Ce n'est pourtant pas faire preuve de trop d'indulgence que d'accorder à la philosophie ce crédit : sa réticence, en l'espèce, n'est pas dépourvue de fondement, parce qu'elle peut tout de même se lire comme la marque d'une certaine fidélité à elle-même. C'est qu'elle consiste surtout en un certain régime d'interrogation, dont on ne voit pas pourquoi le champ d'exercice devrait être* a priori *limité.* »

Ainsi débute *D'une philosophie à l'autre*, où Bruno Karsenti fait sienne cette fidélité dans l'universalisation du questionnement des savoirs et des disciplines propres à la philosophie. Quand bien même constituée en discipline « *munie de son* cursus honorum *et de ses critères d'appartenance* », la philosophie ainsi conçue conduit à ce qu'elle soit elle aussi interrogée et confrontée à son ambition réflexive. Il en va particulièrement de sa capacité à penser les sciences sociales et, à travers elles, sa propre ambition : « *Un engagement à connaître qui, à mesure qu'il s'affirme, invente sa propre rigueur, une rigueur que la connaissance spécialisée et professionnalisée doit renoncer à tenir définitivement sous scellés.* » Si la philosophie s'est donnée, avec Socrate rapporté par Platon *(La République)* et relu par Max Weber *(Le Savant et le Politique)*, « *un des grands moyens de toute connaissance scientifique, à savoir le concept* », le doute a cependant grandi sur sa possibilité même d'élaborer des vérités sur la connaissance.

La philosophie n'a pas renoncé pour autant à se constituer en savoir disciplinaire, comme en témoignent l'invention de l'histoire de la philosophie ou la naissance de la phénoménologie. L'apport de Bergson, dont Bruno Karsenti est un spécialiste, est capital à cet égard pour comprendre cette tension inhérente à la philosophie contemporaine entre le sujet et le concept. Un autre défi à la singularité philosophique a cependant surgi au moment où Max Weber, en 1917, proclamait : « *La vérité éternelle qui ne passera jamais, comme le fait l'activité aveugle des hommes.* » Ce défi est porté par la philosophie des sciences sociales, constituée non seulement en « identité disciplinaire tangible » mais aussi en nouvelle interrogation pour la philosophie elle-même, en ce sens qu'avec les sciences sociales et leur émergence dans l'espace du travail intellectuel la pratique philosophique s'est révolutionnée.

Sous-titre : *Les sciences sociales et la politique des Modernes*, Gallimard, coll. « NRF Essais », 2013, 354 p., 26 €.

Relation sociale. En résumé, on serait passé « *d'une philosophie à une autre* ». Bruno Karsenti repart de Max Weber pour montrer que la philosophie relève du *cogito*, mais qu'elle a à voir avec les conditions historiques et sociales de son émergence : « *Le dialogue philosophique a été un mode inédit de relation sociale, destiné à faire bouger les choses.* » Cette révélation de la part du social dans la naissance de la philosophie permet d'en proposer une autre définition, non pas la quête de la « vérité éternelle » mais l'enracinement dans l'expérience humaine, qui ne lui fait pas perdre pour autant sa spécificité théorique. Là aussi joue pleinement l'héritage de Bergson, récemment revisité à l'occasion des rééditions de son œuvre.

Pour les sciences sociales naissantes à la fin du XIX[e] siècle, la philosophie a représenté de ce point de vue un danger. Elles l'ont, surtout en France, expulsée de leur champ. L'effort de Bruno Karsenti consiste à ramener la philosophie vers les sciences sociales en montrant comment elles s'irriguent au-delà du conflit, en recomposant méticuleusement ses propres travaux de chercheur depuis une décennie, en s'inspirant de l'œuvre de Michel Foucault. Le chapitre « La politique du dehors » est consacré à la démonstration de la teneur politique des sciences sociales, un acte philosophique par excellence. ■

PAR **Vincent Duclert**, professeur à l'EHESS, responsable du *Blog des Livres de La Recherche*.

lu d'ailleurs

Higgs

Jim Baggott

Encore lui, vraiment ? Que peut-on apprendre de nouveau sur la plus médiatisée d'entre toutes les particules élémentaires ? Au-delà de cette Higgstérie qui a déferlé dans les jours suivant l'annonce de sa découverte, les apparitions fugaces de celle-par-laquelle-la-masse-existe constituaient le dernier chapitre d'une belle histoire : celle du modèle standard de la physique des particules. Et c'est cette histoire que raconte Jim Baggott.

Mais comment a-t-il pu sortir une telle bible moins de six semaines après que le CERN a annoncé la très probable existence de son sujet principal ? *« C'est la première fois que je vois un livre écrit en grande partie dans l'anticipation d'une découverte »*, note d'ailleurs le physicien américain Steven Weinberg en avant-propos. On aurait pu craindre, un peu comme avec ces biographies écrites en toute hâte au décès d'une personnalité, l'entreprise bâclée. Il n'en est rien. Jim Baggott était sur le coup depuis juin 2010.

Sous-titre : *The Invention and Discovery of the "God Particle"*, Oxford University Press, 2012, 304 p., 19 €.

De quoi est fait le monde ?

Le livre commence et se termine par cette même question. Il y a d'abord eu la réponse des Grecs : quatre éléments indestructibles – terre, eau, air, feu –, parfois joints par les forces d'attraction de l'Amour, parfois séparés par les forces répulsives du Conflit. D'expérience en expérience, de calcul en calcul, Jim Baggott entraîne le lecteur au cœur de cette quête des constituants de la matière, où l'on voit tour à tour émerger des atomes, d'abord indivisibles, puis le trio protons-neutrons-électrons, puis des quarks, des leptons, des bosons, le tout gouverné par quatre grandes forces que l'on tente d'unifier.

Face aux ruptures de symétrie et de champs scalaires, on a parfois envie de renoncer à cette lecture malgré quelques habiles analogies à la mode, tel le visage de l'actrice britannique Elizabeth Hurley pour illustrer la notion de symétrie. Mais le ton devient résolument accessible en seconde partie, lorsqu'on passe de la définition du modèle standard à la découverte de chacune de ses particules manquantes.

On se laisse alors emporter par le récit de la construction d'accélérateurs de plus en plus puissants sur fond de rivalité politique entre le CERN, d'un côté de l'océan Atlantique, et le Fermilab de l'autre. Aucun rebondissement ne nous est épargné, qu'il s'agisse du vote de la Chambre des représentants lorsqu'est venu le temps de sceller le sort du supercollisionneur supraconducteur (projet qui n'a laissé qu'un grand trou dans le désert du Texas), de cette compétition informelle où 117 physiciens ont tenté d'expliquer au ministre de la Science britannique l'importance de la chasse au boson pour gagner une bouteille de champagne, ou des fausses alertes qui ont circulé sur Internet. Jusqu'à l'ultime rebondissement, l'annonce tant attendue du 4 juillet dernier, qui, à défaut de mettre un point final à cette grande quête du pourquoi et du comment, conclut un de ses chapitres les plus excitants, et pave la voie à ceux qui s'écriront dans les années à venir.

■ **Par Marie-Pier Elie, journaliste à Montréal**

à signaler

Archéologie

Les premières villes de Gaule

Stephan Fichtl

Archéologie Nouvelle, 2012, 160 p., 28 €.

Au Ier siècle avant Jésus-Christ, les Celtes bâtirent des villes fortifiées, décrites par Jules César dans son ouvrage *La Guerre des Gaules* sous le terme d'*oppida*. Professeur d'archéologie, l'auteur raconte dans ce livre richement illustré l'histoire de ces agglomérations à vocation à la fois politique, religieuse et économique, jusqu'à leur disparition progressive durant le IIe siècle après Jésus-Christ.

Technologie

Énergie : la science peut-elle changer la donne ?

Pierre Papon

Le Pommier, 2012, 64 p., 5 €.

La demande énergétique mondiale ne cesse de

croître quand les ressources fossiles diminuent. Seul recours possible, générer, stocker et consommer l'énergie autrement. L'auteur, ancien directeur du CNRS, passe en revue les voies empruntées par la science pour assurer la transition énergétique.

Botanique

Les Plantes du Sahel
Gilles Boëtsch, Antonio Guerci, Lamine Gueye et Aliou Guisse (dir.)
CNRS Éditions, 2012, 426 p., 29 €.

L'avancée du désert au Sahel ne permet plus aux populations locales d'assurer leur bien-être. Dans ce contexte est né le projet de la « grande muraille verte ». Il unit 11 pays sahéliens pour lutter contre la désertification et l'exode rural qui en découle. Ce livre regroupe les avis de botanistes, de médecins et de sociologues, qui étudient les possibilités offertes par les végétaux régionaux pour subvenir aux besoins alimentaires et sanitaires de cette partie de l'Afrique.

Paléontologie

T. rex
Jean Le Lœuff
Éditions du Sauropode, 2012, 219 p., 18 €.

Depuis la découverte du premier fossile par Barnum Brown en 1900 dans le Dakota du Sud, le *Tyrannosaurus rex* a été analysé sous tous les angles. Dans cet ouvrage accessible à tous, le paléontologue Jean Le Lœuff retrace l'histoire du plus célèbre des dinosaures. De sa carrière cinématographique et littéraire sans égale, à ses habitudes alimentaires, aucun détail, même le plus croustillant, ne nous est épargné.

Physique

3 minutes pour comprendre les grandes théories d'Einstein
Paul Parsons
Le Courrier du livre, 2012, 160 p., 18 €.

On a beaucoup écrit sur Albert Einstein. Ce livre en est un nouvel exemple, bien conçu. Après une partie biographique, il détaille pour le grand public les travaux du célèbre physicien (structure de la matière, lois de la relativité, etc.) en proposant des renvois entre les sujets connexes, un résumé de chaque grande idée « en 3 secondes », ou encore des glossaires. La troisième partie raconte l'énorme influence qu'a eue Einstein sur la physique des XX^{e} et XXI^{e} siècles.

Agriculture

Vive l'agro-révolution française !
Vincent Tardieu
Belin, 2012, 480 p., 22 €.

Comment nourrir 9 milliards d'êtres humains en 2050 ? Pour l'auteur, journaliste scientifique, l'agriculture chimique et industrielle n'est pas une fatalité. Après avoir rencontré une centaine d'agriculteurs et de chercheurs partout dans l'Hexagone, il dresse un panorama des pratiques agricoles écologiques, récemment apparues face à la crise du modèle productiviste. D'après lui, cette agro-révolution amorcée par certains agriculteurs nécessite pour être généralisée de bouleverser les marchés et notre manière de consommer. >>>

TOUCHE PAS À MA SCIENCE

Une fusion qui laisse froid

Si on dresse un jour la liste de tous les méfaits d'Internet, il ne faudra pas oublier celui que mentionne Jean-Paul Bibérian dans *La Fusion dans tous ses états* (p. 194) : *« Sans ce nouveau médium, il est probable que la fusion froide aurait disparu pour de nombreuses années. »* Et cela aurait été une bonne chose ! Que ceux qui n'ont jamais entendu parler de cette fusion froide se rassurent, ils n'ont rien manqué. Le phénomène a eu les honneurs des médias en 1989. Martin Fleischmann et Stanley Pons, électrochimistes de bonne renommée travaillant à l'époque à l'université de l'Utah, ont alors annoncé qu'ils avaient réalisé la fusion d'atomes d'hydrogène (réaction nucléaire qui, à très haute température, fournit l'énergie du Soleil) avec un simple dispositif d'électrolyse de l'eau. Malheureusement, toutes les tentatives de reproduire cette expérience ont échoué. C'est ce qui ressort du récit de Jean-Paul Bibérian, bien que celui-ci ne ménage pas sa peine pour nous convaincre du contraire. En outre, comme il l'écrit aussi : *« Il n'existe pas de théorie satisfaisante de la fusion froide* (p. 133). » Cette dénomination recouvre donc des faits inexistants expliqués par une théorie tout aussi inexistante. À quoi bon alors citer en défense la phrase de Max Planck selon laquelle : *« Une théorie nouvelle ne triomphe jamais. Ce sont ses adversaires qui finissent par mourir* (p. 186) » ? Dans le cas de la fusion froide, il devrait plutôt redouter que, malgré Internet, ses partisans ne disparaissent rapidement. ■ Luc Allemand

Jean-Paul Bibérian, *La Fusion dans tous ses états*, Guy Trédaniel, 240 p., 18 €, 2012.

Les livres

>>> Biologie

Sommes-nous tous voués à disparaître ?

Éric Buffetaut

Le Cavalier Bleu, 2012, 153 p., 18 €.

« *La sélection naturelle conduit à l'extinction d'espèces* », « *Ce sont les espèces rares qui s'éteignent le plus facilement* », « *Le dodo a été exterminé par l'homme* » : on le croit souvent, mais est-ce vrai ? Le paléontologue Éric Buffetaut s'attaque à ces trois idées reçues – et à seize autres – dans ce livre alerte, où il démêle le vrai du faux en tirant parti des données historiques et des résultats de la science moderne.

Neurosciences

Le Camion et la Poupée

Jean-François Bouvet

Flammarion NBS, 2012, 238 p., 19 €.

L'homme et la femme ont-ils un cerveau différent ? Un sujet épineux auquel le neurobiologiste Jean-François Bouvet a voulu apporter sa contribution. Pour construire son avis, l'auteur examine les arguments des deux tendances qui s'opposent. D'un côté les partisans du déterminisme génétique et d'un sexe inné du cerveau. De l'autre, les adeptes d'une identité sexuelle socialement construite. Livre facile à lire, sujet difficile à trancher !

Environnement

Les Missions militaires au service de la biodiversité

Sarah Brunel

EDP sciences, 2012, 132 p., 19 €.

La biodiversité et le secteur militaire sont liés à divers titres : les conflits armés ont un impact nocif sur les populations d'espèces animales ou végétales. La répartition des ressources environnementales peut aussi être à l'origine de heurts entre pays frontaliers. L'auteur, experte en protection des végétaux et biosécurité, développe dans ce livre très référencé la façon dont les états-majors prennent en compte la protection de l'environnement au sein de leurs missions.

Épistémologie

Dialogues sur l'émergence

Rémy Lestienne

Le Pommier, 2012, 216 p., 23 €.

Décrire le tout grâce à ses parties : la science a longtemps progressé ainsi, telle la physique, à partir des particules. Mais au XX[e] siècle, le réductionnisme montre ses limites. Les scientifiques développent le concept d'émergence, en soulignant l'importance des facteurs extérieurs : interactions avec l'environnement, effets du hasard, etc. Ces deux visions de la science coexistent désormais. L'auteur retrace cette évolution par un dialogue, où figurent de grands scientifiques.

Matériaux

Développons les nanomatériaux !

Sophie Carenco

Rue d'Ulm, 2012, 68 p., 7,50 €.

L'émergence des nanosciences et de ses applications, les nanotechnologies, suscite bien des questionnements. Que fabrique-t-on aujourd'hui dans les laboratoires de recherche et les industries ? Pour quels usages ? Quels sont les risques pour l'homme et son environnement ? L'auteure, chimiste, apporte des réponses et ouvre des pistes de réflexion sur l'avenir, en se référant aux technologies qui feront probablement partie un jour de notre quotidien, tels les nanorobots. En s'introduisant dans le corps humain, ils pourraient réparer l'ADN de nos cellules.

Et aussi

La Nature de l'art
Edmond Couchot, Hermann, 2012, 315 p., 28 €.

Seize leçons sur le trauma
Louis Crocq, Odile Jacob, 2012, 295 p., 25,90 €.

BEAU LIVRE

Les Galeries d'anatomie comparée et de paléontologie

Du fossile de *diplodocus* à la horde de squelettes d'animaux sauvages, ce livre propose une visite illustrée des galeries d'anatomie comparée et de paléontologie du Muséum national d'histoire naturelle. Le photographe Bernard Faye parvient à restituer l'atmosphère unique de ces galeries en alternant plans larges et plans serrés. Le texte, signé Luc Vives et Cécile Colin-Fromont, responsables des galeries, raconte l'odyssée des collections, l'histoire des lieux et celle de certains biologistes illustres qui y ont séjourné.

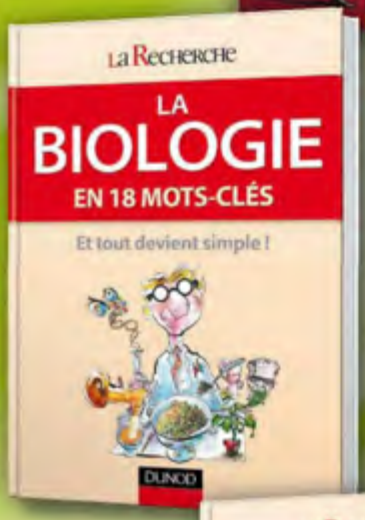
Luc Vives et Cécile Colin-Fromont, photographies de Bernard Faye, Les éditions du Muséum, 2012, 96 p., 12 €.

DUNOD, LE PLAISIR DES SCIENCES

En partenariat avec La Recherche

EAN13 : 9782100562992 • Prix TTC France **16 €**

EAN13 : 9782100546503 • Prix TTC France **15 €**



EAN13 : 9782100530076 • Prix TTC France **13,90 €**

EAN13 : 9782100530069 • Prix TTC France **13,90 €**

EAN13 : 9782100530052 • Prix TTC France **13,90 €**

EAN13 : 9782100530403 • Prix TTC France **13,90 €**

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Durant plus d'un siècle, les circonstances qui ont présidé à la naissance de la Lune ont alimenté les spéculations les plus vives. Et ce n'est pas tout à fait terminé.

La Lune est-elle fille de la Terre ?

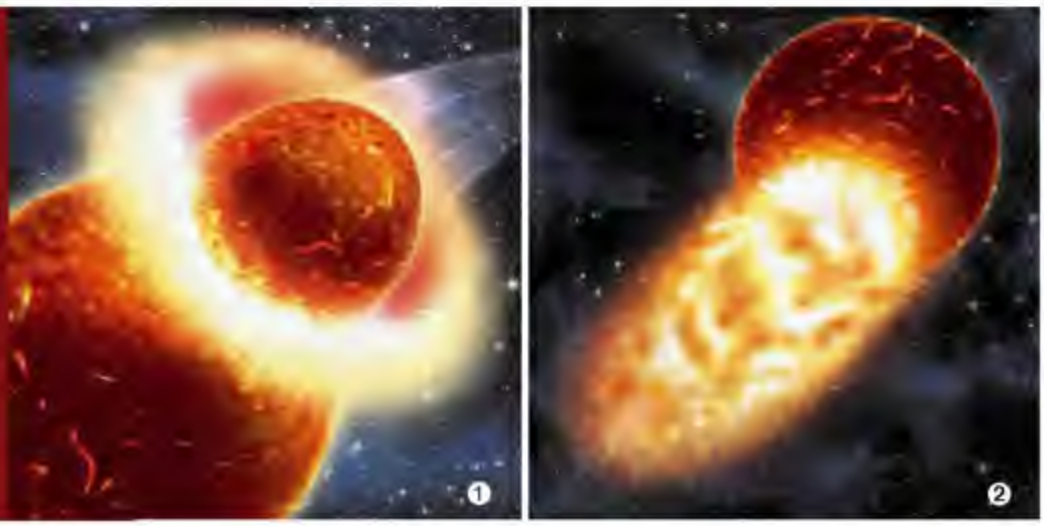
Bon sang ne saurait mentir, affirme le proverbe. En ce qui concernait George Howard Darwin, en tout cas, il ne se trompait pas. Après une brève incursion dans le monde juridique, le fils du célèbre naturaliste Charles Darwin avait fini par suivre les traces de son père, et s'était tourné lui aussi vers une théorie de l'évolution. Mais une évolution bien particulière, celle du système solaire.

Les recherches effectuées dans ce cadre l'ayant conduit à s'interroger sur les origines de notre satellite, George Darwin s'était lancé, dès 1878, dans une série de calculs prenant en compte les forces de marée s'exerçant entre la Lune et la Terre. Il en résultait que la Lune s'éloignait progressivement de notre planète, tandis que la Terre tournait de moins en moins vite. Étant donné qu'il était possible de prévoir les modifications futures de l'orbite lunaire, il devait être tout aussi possible de reconstituer ses variations dans le passé.

Théorie de l'éjection. Fort de cette conviction, George Darwin calcula qu'il y a 50 millions d'années environ la Terre accomplissait une rotation sur elle-même en 5 à 6 heures, alors que la Lune gravitait autour d'elle à moins de 10 000 kilomètres. En extrapolant ces résultats, il en avait conclu que, dans un passé encore plus reculé, la Terre et la Lune avaient été au contact l'une de l'autre, au point de ne faire qu'un. La vitesse de rotation de la Terre, estimée à deux heures et demie, était alors si élevée qu'elle était renflée à l'équateur sous l'effet des forces centrifuges. Un morceau s'en était détaché : la Lune. Et le géologue britannique Osmond Fisher d'affirmer que les profondeurs de l'océan Pacifique étaient la cicatrice de cet arrachement de matière !

La théorie était séduisante et fut accueillie avec enthousiasme par le monde scientifique en général et par Darwin père en particulier. Au milieu de ce concert de louanges, s'élevèrent malgré tout quelques voix discordantes, dont celle de l'astronome français Édouard Roche.

En 1848, Roche avait montré qu'en deçà d'une certaine distance d'une planète l'attraction gravitationnelle exercée par cette dernière empêchait la matière de faire bloc. La protubérance éjectée par la Terre, s'étant formée à l'intérieur du « domaine de Roche », aurait dû éclater en



Selon le scénario le mieux étayé (ici en vue d'artiste), un corps céleste serait entré en collision avec la Terre, il y a 4,5 milliards d'années (1). Après la fusion des deux noyaux, de la matière éjectée se serait amassée (2, 3), des débris éjectés auraient tourné autour de la Terre (4) et fini par s'agglomérer pour former notre satellite (5).

© PHOTOS : JACOPIN/BSIP

morceaux et former un anneau autour de la planète, comme pour Saturne.

George Darwin rétorqua en affirmant qu'un tel anneau aurait produit des forces de marée suffisantes pour ralentir la rotation terrestre. Du coup, l'anneau se serait éloigné de la Terre et aurait franchi la limite de Roche, ce qui rendait possible son accrétion. Une autre objection fut plus difficile à réfuter. Comment expliquer que le plan de l'orbite lunaire soit distinct de celui de l'équateur terrestre ? Le fragment de Terre qui avait donné naissance à la Lune aurait dû se mouvoir dans le plan de l'équateur. Or la différence observée dépassait cinq degrés !

La Terre et la Lune pouvaient s'être formées côte à côte, dans le nuage de poussières qui deviendrait le système solaire

Formation simultanée. Roche, lui, proposait une théorie de coaccrétion, échafaudée quelques années auparavant et selon laquelle la Lune n'était pas fille mais sœur de la Terre. Les deux astres se seraient formés côte à côte, au-delà de la limite de Roche, dans le nuage de gaz et de poussières qui allait constituer le système solaire. Roche était néanmoins conscient des faiblesses de cette hypothèse, que ses détracteurs ne manquèrent pas de souligner. L'observation astronomique et les lois de la mécanique avaient permis de déterminer la masse de la Lune et son rayon. De là il avait été facile d'en déduire sa densité qui, au lieu d'être comparable à celle de la Terre, apparaissait beaucoup plus faible : avec un quart de la taille de la Terre, la Lune affichait à peine plus de 1 % de sa masse.

Face à ces arguments, les astronomes étaient partagés quant au lien de parenté unissant la Terre à la Lune. Un troisième scénario, dit de capture, vint encore ajouter à leur perplexité. En 1909, pour expliquer la différence de densité entre les deux astres, l'astronome américain Thomas Jefferson See suggéra que la Lune se serait formée aux confins du système solaire, bien au-delà d'Uranus, dans des régions reculées où le rayonnement solaire ne pouvait faire perdre aux planètes leurs éléments légers. À l'origine, la Lune aurait tourné autour du Soleil, mais la présence sur son passage de poussières et de débris cosmiques lui aurait fait perdre de l'énergie et changer d'orbite. De fil en aiguille, elle serait passée au voisinage de la Terre, où elle aurait été capturée en plein vol par le champ de gravitation de celle-ci.

Mais là encore, la théorie accusait des faiblesses notoires. Outre la faible probabilité de l'événement, la Lune était trop grosse pour avoir été ainsi détournée par la Terre. Des cas de capture avaient certes été recensés pour Saturne et Jupiter, mais avec des satellites beaucoup plus petits ! Et qui évoluaient sur des orbites allongées et non pas circulaires, comme la Lune.

En outre, pourquoi un satellite capturé par la Terre ne cesserait-il de s'en éloigner ? See répliqua que rien ne prouvait que, comme l'avait affirmé George Darwin, la Lune s'éloignait effectivement de la Terre. Ce fait ne serait vérifié que bien plus tard, après que les astronautes des missions Apollo eurent déposé des miroirs sur la Lune afin de mesurer sa distance par aller et retour d'un faisceau laser. Faute de mieux, le scénario de capture survécut pendant >>>

Marie-Christine de La Souchère,
agrégée de physique.
mcsouchere@hotmail.com

3

4

5

La Lune est-elle fille de la Terre ?

© ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY/SPL/COSMOS

George Darwin, fils du naturaliste, décrivit d'un point de vue mathématique les rapports entre la Terre, la Lune et le Soleil.

>>> plusieurs décennies. La majorité des scientifiques rejetait les scénarios de fission et de coaccrétion, les considérant comme moins plausibles. Les choses commencèrent à se décanter véritablement dans les années 1970, après que les missions américaines Apollo eurent livré leur moisson d'échantillons lunaires, que les laboratoires s'empressèrent d'analyser.

Thèse de l'impact géant. Ces roches se révélaient semblables à celles du manteau terrestre, d'âge similaire, mais plus pauvres en éléments volatils comme le sodium, le potassium ou le zinc. Cette pénurie suggérait qu'une grande partie de la Lune avait jadis été en fusion. Forts de ces résultats, le peintre et planétologue William Hartmann, avec Donald Davis, de l'institut des sciences planétaires de Tucson, en Arizona, Alastair Cameron et William Ward, de l'université Harvard, dans le Massachusetts, proposèrent en 1975 un scénario original, dit de l'« impact géant ».

Une planète de la taille de Mars, baptisée Théia en hommage à la déesse grecque mère de la Lune, aurait percuté la Terre en gestation, il y a plus de quatre milliards d'années. Le choc aurait fait basculer la Terre, d'où l'inclinaison de l'axe des pôles, et projeté dans l'espace un nuage de vapeur et de poussières. Celui-ci, après avoir formé un anneau autour de la Terre, aurait franchi la limite de Roche et se serait amalgamé en l'espace de quelques mois pour former la Lune.

Si les simulations informatiques effectuées dans la décennie suivante vinrent renforcer cette hypothèse, un point restait inexpliqué. Un même élément chimique se présente ordinairement sous la forme de plusieurs variétés, les isotopes, qui diffèrent par leur masse. Dans un nuage protolunaire à haute température, issu d'une collision violente, les isotopes les plus légers auraient dû s'évaporer, ne laissant subsister que les plus lourds. Or nulle trace d'un tel fractionnement isotopique n'apparaissait dans les roches analysées.

Fallait-il pour autant renoncer à un modèle si séduisant et revenir à des scénarios de capture ou de coaccrétion ? Quelques scientifiques franchirent le pas. En 2004, deux chercheurs américains, Richard Gott et Edward Belbruno, de l'université de Princeton, suggérèrent que la Lune s'était formée à la même distance du Soleil que la Terre, en des points dits de « Lagrange », avant de dériver vers notre planète sous l'effet de perturbations extérieures.

Puis, en 2008, deux géophysiciens néerlandais, Rob de Meijer et Wim van Westrenen, insinuèrent que la Lune avait pour origine une gigantesque explosion nucléaire, fruit d'une concentration anormalement élevée d'uranium et de thorium à l'interface entre le manteau et le noyau de la Terre. Mais ce type de scénario ne rencontra guère d'écho, et la plupart des chercheurs s'en tinrent au modèle de l'impact géant. Leur patience fut récompensée, le 18 octobre 2012, lorsque la revue britannique *Nature* publia une étude de Frédéric Moynier, de l'université de Washington, à Saint-Louis, aux États-Unis. L'analyse d'une vingtaine d'échantillons de basaltes, prélevés en divers endroits du sol lunaire et comparés aux roches terrestres, martiennes et météoritiques, laissait systématiquement apparaître un excès de zinc lourd. Preuve d'un fractionnement isotopique à grande échelle.

Compositions similaires. Malgré cela, des incertitudes demeurent. Dans le cas de substances réfractaires, c'est-à-dire difficiles à vaporiser, la Lune, née à la fois de la Terre et de Théia, aurait dû présenter une composition isotopique reflétant ces deux origines, *a priori* bien différentes. Or, en 2011, Junjun Zhang, de l'université de Chicago, et ses collègues avaient procédé à l'analyse isotopique du titane : les titanes terrestre et lunaire s'étaient révélés rigoureusement identiques, de même que d'autres éléments.

Pour tenter d'expliquer cette particularité, l'équipe de Robin Canup et Julien Salmon, de l'institut de recherche de Boulder, dans le Colorado, développe des modèles selon lesquels l'accrétion de l'anneau protolunaire se serait effectuée en une centaine d'années au lieu de quelques mois. Ce qui aurait permis une homogénéisation des matériaux de la Terre et de Théia. Andreas Reufer, de l'université de Berne, en Suisse, lui, penche plutôt pour un choc entre une Théia beaucoup plus massive que Mars et dotée d'une vitesse bien plus élevée. Théia n'aurait fait qu'effleurer la Terre, lui arrachant une partie de sa masse, avant de poursuivre sa route. Le matériau projeté aurait donc été terrestre dans sa quasi-intégralité.

Stimulés par ces résultats, les chercheurs poursuivent leurs investigations au travers de nouvelles simulations informatiques, jouant sur des paramètres comme la masse, l'angle et la vitesse d'impact de Théia. Dans la ferme intention de déterminer si la Lune est fille de la Terre... à part entière ! ■

Pour en savoir plus

> Édouard Roche, *Essai sur la constitution et l'origine du système solaire*, Gauthier-Villars, 1873.

> Julien Salmon et Robin Canup, *The Astrophysical Journal*, doi : 10.1088/0004-637X/760/1/83, 2012.

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

Et recevez en cadeau l'agenda 2013 Exacompta

Sobre et élégant, cet agenda de poche réalisé spécialement pour vous, vous accompagnera au quotidien.
Un format pratique, avec une semaine sur 2 pages afin de visualiser votre planning d'un seul coup d'œil.

- Semaine sur 2 pages • Répertoire et Atlas en couleur amovible • Un stylo noir et or
- Couverture synthétique façon winner piqûre sellier ton sur ton • Couleur : noir
- Format 8,5 x 16 cm reliure spiralée.

Choisissez le 4 x sans frais

15€50

Simple !
Pratique !
Sans contraintes !

1 an : 62€ au lieu de ~~90,90€~~
soit plus de 30% de réduction !

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 17, route des Boulangers - 78926 Yvelines cedex 9

FLRC472

OUI, je souhaite m'abonner à La Recherche et recevoir en cadeau l'agenda 2013 Exacompta et son stylo signé La Recherche.

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS** (dont 2 numéros spéciaux) au prix de **62€** au lieu de ~~90,90€~~.

Je suis étudiant* ou enseignant* : je ne paie que 56€.

☐ Je profite du paiement en **4 fois sans frais** et je règle dès maintenant **15€50** par chèque ou CB, le quart du montant de mon abonnement.

Puis je recevrai par courrier l'autorisation de prélèvement qui me permettra de régler les trois autres versements par prélèvement automatique trimestriel.

Je suis étudiant* ou enseignant* : je ne paie que 14€.

J'indique ci-dessous mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : _____

Ville : _____

Téléphone : _____

Si vous souhaitez recevoir des offres de notre part, merci de nous indiquer votre e-mail :

_____ @ _____

Je règle à l'ordre de La Recherche par :

☐ Par chèque ☐ Par carte bancaire

Numéro CB : _____

Notez aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de votre carte bancaire, au niveau de la signature : _____

Expire fin : _____

Signature obligatoire

La Recherche
L'actualité des sciences

Sophia Publications - SA au capital de 115 500 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31/03/2013 dans la limite des stocks disponibles. * Pour bénéficier de ce tarif préférentiel, merci de nous envoyer un justificatif de votre statut. Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez cette case ☐.

Agenda

Le 2 février, 14 h 30

Le futur de l'astronomie

CONFÉRENCE. L'astronomie développe des instruments sophistiqués pour sonder l'espace avec plus de précision, et ce dans toutes les longueurs d'onde. L'astronome Édouard Oblak, de l'observatoire de Besançon, décrit les progrès attendus à l'avenir dans les connaissances sur les exoplanètes ou sur les débuts de l'Univers.

Besançon, observatoire. http://tinyurl.com/conf-ufc

Le 5 février, 18 h 30

Les textes mathématiques au Moyen Âge

CONFÉRENCE. L'histoire des mathématiques traite peu du Moyen Âge. Pourtant, les mathématiques médiévales ont produit des résultats sous des formes diverses, qui ont influencé l'écriture mathématique. Sabine Rommevaux, chercheuse en histoire des sciences à l'université Paris-VII, en fait la présentation.

Poitiers, espace Mendès-France. http://tinyurl.com/emf-maths-medievales

Le 5 février, 19 h 30

La découverte du boson de Higgs

CONFÉRENCE. Bruno Mansoulié, physicien au CEA, a participé à la conception du LHC, le grand accélérateur de particules du CERN ayant permis la découverte d'une nouvelle particule, fort ressemblante au boson de Higgs. Il explique le rôle de cette particule dans la compréhension de la matière et l'importance de sa découverte pour la physique.

Paris, Institut d'astrophysique. http://tinyurl.com/IAP-conf-2013

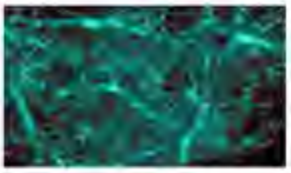
Le 5 février, 20 h

La genèse des Andes

CONFÉRENCE. La cordillère des Andes s'est formée de façon très irrégulière. Comment s'explique ce phénomène ? Joseph Martinod, géologue à l'université Paul-Sabatier, décrypte l'histoire géologique de cette chaîne de montagnes pour montrer le rôle de la subduction océanique.

Toulouse, observatoire Midi-Pyrénées. www.obs-mip.fr/grandsseminaires

Le 6 février, 20 h



Le grand attracteur

CONFÉRENCE. Notre galaxie et celles qui l'entourent sont attirées vers un « grand attracteur », dont la nature demeure inconnue. L'expérience Cosmic Flows tente d'éclaircir le mystère en cartographiant cette région de l'Univers. Hélène Courtois, astrophysicienne à l'institut de physique nucléaire de Lyon, présente les dernières recherches sur le sujet.

Lyon, musée des Confluences. http://tinyurl.com/cala-conf-12-13

Le 9 février, 19 h

© ELISEBEIFFE.COM

Mammouth toujours

SPECTACLE. Quand les hommes modernes rencontrent les hommes préhistoriques, cela donne lieu à des situations drôles et poétiques. À travers une dizaine de tableaux, sur les thèmes de la survie, de la fraternité, ou de la relativité de l'espace et du temps, les comédiens interrogent l'évolution d'*Homo sapiens*.

Nemours, musée de Préhistoire d'Île-de-France. www.musee-prehistoire-idf.fr/agenda/events/2315

Le 11 février, 19 h

Les mathématiques expérimentales

CONFÉRENCE. « *Oui, les mathématiques expérimentales existent* », affirme François Guénard, du département de mathématiques de l'université d'Orsay. Pour nous en convaincre, il présente des expériences ayant pour objet des nombres, matrices ou suites numériques, permettant de se plonger dans l'infiniment petit et l'infiniment grand.

Paris, espace Pierre-Gilles-de-Gennes. http://tinyurl.com/conf-espgg

Le 12 février, 14 h 30

La listeria, des aliments au cerveau

CONFÉRENCE. La listeria monocytogène est une bactérie qui contamine de nombreux aliments. Marc Lecuit, chercheur à l'Institut Pasteur, montre la façon dont celle-ci peut conduire au développement de la listériose, se disséminer dans le cerveau, ou traverser la barrière placentaire et atteindre le fœtus.

Paris, Institut Pasteur. http://http://tinyurl.com/prog-conf-pasteur-2013

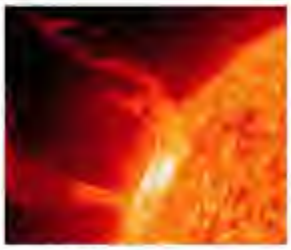
Le 12 février, 20 h 30

Les énergies du futur

CONFÉRENCE. La production de biocarburants impose l'utilisation de matériaux pouvant supporter des conditions extrêmes, notamment en température. Chercheur à l'école polytechnique d'Orléans, Jacques Poirier explique comment ils sont mis au point, grâce à la modélisation numérique et à l'expérimentation.

Orléans, Muséum. http://tinyurl.com/ccsti-mardis-science

Le 15 février, 20 h 30



Les colères méconnues du Soleil

CONFÉRENCE. Les fantastiques éjections de matière dans la couronne solaire peuvent provoquer des perturbations des réseaux électriques et des systèmes électroniques des avions ou des satellites. Que sait-on de ces phénomènes et de leurs conséquences ? Comment les prédire ? C'est ce qu'explique Antoine Llebaria, ingénieur de recherche au laboratoire d'astrophysique de Marseille.

Marseille, observatoire. http://tinyurl.com/andromede-conf-2013

à ne pas manquer

Salon du livre d'histoire des sciences et des techniques

Le thème de l'énergie est au cœur de cette huitième édition du Salon du livre d'histoire des sciences et des techniques. Pendant trois jours, de nombreux scientifiques, historiens et philosophes interviennent lors de tables rondes, conférences et débats autour de cette vaste problématique, couvrant de nombreux sujets. Quelle est la place du travail humain ? Quelles technologies peuvent contribuer à une transition énergétique ? Comment nourrir l'humanité ? Pour éclairer notre situation actuelle, ces rendez-vous retracent l'histoire des différents systèmes énergétiques qui se sont succédé depuis plusieurs siècles, de la machine à vapeur au nucléaire, et des controverses qui les ont accompagnés.

Du 8 au 10 février, à Ivry-sur-Seine. http://tinyurl.com/salon-livre-hst-ivry

Anniversaire

> POUR LE TRICENTENAIRE de la naissance de Rousseau, le Muséum de Grenoble propose une exposition, visible jusqu'au 10 mars, sur le thème de la nature, cher au philosophe. Quelle vision l'homme a-t-il de la nature ? Et quelle place se donne-t-il parmi la diversité du vivant ? L'exposition remonte jusqu'à la Préhistoire, et propose un parcours présentant six visions différentes de la nature. La scénographie est conçue comme une balade telle que les aimait Rousseau, et fait voyager le visiteur à travers l'histoire humaine. « C'est ma nature » est accessible à tous, grâce à une large sélection de textes, de films et d'ateliers. Elle donne à écouter, toucher, observer, discuter et se questionner autour des idées présentées, pour permettre à chacun de construire sa propre vision de la nature.

> http://tinyurl.com/Grenoble-expo-rousseau

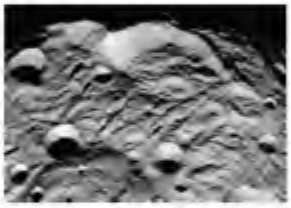
Le 19 février, 20 h

Qu'est-ce que la réalité ?

CONFÉRENCE. Quel rapport y a-t-il entre des théories abstraites et la réalité sensible ? Le physicien François Charru, de l'université Paul-Sabatier, montre comment les scientifiques construisent la réalité plus qu'ils ne la dévoilent, à l'aide d'exemples tirés de la mécanique des fluides, sa spécialité.

Toulouse, observatoire Midi-Pyrénées. www.obs-mip.fr/grandsseminaires

Le 27 février, 19 h 30



Des météorites aux astéroïdes

CONFÉRENCE. Plus que de simples cailloux, les météorites sont des fragments d'astéroïdes ou de planètes témoignant des origines du système solaire, il y a quatre milliards et demi d'années. Jean-Pierre Luminet, du laboratoire Univers et théories de l'Observatoire de Paris, dévoile leur intérêt scientifique et les conséquences que peuvent avoir leurs collisions avec la Terre.

Paris, ESPCI ParisTech. http://tinyurl.com/transboreal-science-conscience

Jusqu'au 24 mars

La perception du temps chez les Romains

EXPOSITION. Pour connaître l'heure, les Romains fabriquaient des cadrans solaires portatifs. L'un d'eux a été retrouvé récemment à Amiens au cours de fouilles archéologiques. Au total, vingt-quatre de ces véritables montres antiques ont été retrouvées à ce jour, parmi lesquelles six sont exposées ici.

Amiens, musée de Picardie. http://tinyurl.com/cadran-solaire-romain

Jusqu'au 30 mars

Climat : à nos risques et périls

EXPOSITION. Les aléas climatiques de la région lyonnaise, du Moyen Âge à nos jours, sont reconstitués ici à partir d'archives publiques et privées. À travers divers documents, les visiteurs découvrent les événements climatiques qu'ont surmontés les Lyonnais, et apprennent à devenir des historiens du climat.

Lyon, archives municipales. http://tinyurl.com/climat-lyon-histoire

Jusqu'au 31 mars

Éco home

EXPOSITION. L'habitat individuel représente plus de 40 % de notre consommation énergétique. Mais comment concilier le logement avec les économies d'énergie ? Quatre exemples d'habitation illustrent les possibilités de conversion en bâtiments basse consommation.

Mulhouse, musée Électropolis. http://tinyurl.com/c22ga2n

Le mois prochain dans La Recherche

Dossier
Comment notre cerveau décide
Depuis quelques années, les neurosciences révèlent l'influence sur nos décisions de nos perceptions, des actions à entreprendre ainsi que de nos émotions. Elles remettent même parfois en question l'existence de notre libre arbitre.

Savoir
Industrie pharmaceutique et pollution des rivières

Entretien
Jean-Claude Ameisen,
président du Comité consultatif national d'éthique

N° 473 • EN VENTE LE 21 FÉVRIER 2013

La carpe et la boussole

Votre poisson rouge ne vous regarde plus ? Ne désespérez pas, il vous suffit de vous placer au nord ou au sud de l'aquarium. Car les carpes, sensibles au champ magnétique terrestre, auraient une légère tendance à s'aligner selon cet axe. C'est ce qu'affirment des chercheurs tchèques, qui, pour le montrer, ont trouvé un terrain expérimental original : les marchés de Noël ! En Europe de l'Est, manger de la carpe au réveillon est une tradition, et les vendeurs gardent les poissons vivants dans des tonneaux en plastique. Malgré le froid et la période de vacances, les chercheurs ont sillonné le pays pour prendre des centaines de photos de tonneaux de carpes.

Ils ont ensuite manuellement analysé les clichés, plaçant une flèche pour l'axe adopté par chacune des 14 537 carpes photographiées ! Les auteurs de l'étude précisent que les carpes sont vendues légalement et qu'elles n'ont pas subi de mauvais traitements. Ou quand les chercheurs font passer le bien-être de leurs « cobayes » avant le leur...
http://tinyurl.com/carpe-boussole

Effet de fratrie

Avoir un grand frère ou une grande sœur influence à vie. Mais dans quel sens ? Une étude internationale vient d'établir deux effets notables... tout au moins aux XVIII[e] et XIX[e] siècles : en fouillant les registres de l'Église luthérienne de Finlande de cette époque, les auteurs ont montré qu'avoir un(e) aîné(e) offrait plus de chances d'atteindre la maturité sexuelle. En revanche, avec un aîné de même sexe que soi, les chances de se marier se réduisaient, tout comme le nombre d'enfants ! Reste à savoir si ces effets sont encore d'actualité.
http://tinyurl.com/effet-fratrie

L'odeur blanche

Floral, fruité, boisé, médicinal, musqué, poivré. Laurax, c'est à la fois tout cela sans finalement l'être... Car Laurax, baptisé ainsi par ses créateurs - deux chercheurs israéliens - est la nouvelle odeur fabriquée pour être la plus neutre possible. Pour la mettre au point, mélangez ces trente ingrédients-là... ou ces trente autres. Les recettes sont libres : le secret est de mélanger le plus grand nombre de molécules odorantes et de même intensité. Comme la superposition des couleurs de l'arc-en-ciel donne la couleur blanche, ou l'addition de sons aux fréquences diverses produit un bruit blanc, le mélange d'odeurs crée Laurax, l'odeur blanche. Une découverte qui permettra peut-être de mieux comprendre l'odorat. À quand le toucher ou le goût blanc ?
http://tinyurl.com/odeur-blanche

À 14 ans, une publication monstre

Sommes-nous plus attirés par les expressions du visage ou par le regard de l'autre ? Alan Kingstone, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, tentant de répondre à cette question butait toujours sur le même écueil : les êtres humains ayant les yeux au milieu de la figure, impossible de distinguer les expressions du regard ! Un soir, il relate cette impasse à la maison. Son fils, Julian, 14 ans, lui propose aussitôt une solution : pourquoi ne pas utiliser des monstres inspirés d'un de ses jeux vidéo, des créatures ayant les yeux dans les mains ? Eurêka ! Le père emmène son fils au laboratoire, et ils montent un protocole opératoire : ils projettent successivement sur un écran des hommes, des humanoïdes (non humains mais les yeux au milieu du visage) et des monstres (avec les yeux n'importe où), et enregistrent le regard de 22 étudiants volontaires. Résultat : ce sont les yeux qui l'emportent. Corollaire : au collège et déjà premier auteur d'une publication scientifique, Julian peut déjà voir loin. http://tinyurl.com/yeux-monstre

© GERARD LACZIAGE - BEOWULF SHEEHAN/ZUMA/REA

CULTIVONS LE FUTUR

LE JEUDI 23 MAI 2013 AU COLLÈGE DE FRANCE

FORUM

SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

Presenté par

Le Monde

LA Recherche

PROGRAMME ET INSCRIPTION
SUR WWW.FORUM-SRS.COM

csuper.fr

ONTARIO
CANADA

VOICI POURQUOI L'ONTARIO, AU CANADA
EST VOTRE PROCHAINE GRANDE IDEE

L'Ontario, au Canada, est l'un des plus grands centres de recherche biomédicale en Amérique du Nord. Des découvertes révolutionnaires ont lieu tous les jours dans nos laboratoires. Des percées telles que le premier vaccin contre la méningite infantile, la découverte des cellules souches et la première prothèse électrique de bras pour enfant ont eu lieu ici, en Ontario. Nos chercheurs, professionnels et techniciens de classe mondiale créent des produits pour répondre aux normes réglementaires strictes, y compris celles définies par la Food and Drug Administration des Etats-Unis, tout cela dans l'un des environnements les plus concurrentiels du G7 au niveau des prix. Approvisionnez-vous là où l'innovation prend vie. Faites de l'Ontario votre prochaine grande idée.

VotreProchaineGrandeIdee.ca/SourceSciVie

10 %
d'employés de services contractuels (recherche, fabrication, essais cliniques)

21 %
d'employés hospitaliers et universitaires (y compris 10 000 chercheurs)

31 %
d'employés dans les secteurs pharmaceutiques et biotechnologiques (dans des entreprises comme Amgen, Genzyme et Sanofi Pasteur)

38 %
d'employés en technologie médicale avancée (900 entreprises)

Ontario Payé par le gouvernement de l'Ontario.